

مقدمة قصيرة جدًّا

# علم الكونيات

بيتر كولز

# تمهيد

هذا الكتاب مقدمة إلى الأفكار والوسائل والنتائج المتعلقة بالدراسة العلمية للكون.

يشمل نطاق دراسة علم الكونيات كل ما في الوجود. فمنظومة الأشياء التي نسميها الكون تشتمل على ما هو كبير للغاية وما هو صغير للغاية؛ النطاق الفلكي للنجوم والمجرات، والعالم المجهري للجسيمات الأساسية. وبين هذين الحدَّين يكمن تدرُّج معقد من البِنى والأنماط ينتج عن تفاعل القوى والمادة. ونحن — البشرَ — موجودون في وسط كل هذا.

إن هدف علم الكونيات هو وضع كل الظواهر الفيزيائية المعروفة داخل هيكل واحد محكَم. وهذا هدف طموح، ولا تزال ثمة فجوات كبيرة في معارفنا الحالية. ومع هذا، فقد حدث تقدم سريع لدرجة أن الكثير من علماء الكونيات يطلقون على هذا العصر اسم «العصر الذهبي». ولقد انتهجتُ نهجًا تاريخيًّا بالأساس في دراسة هذا الموضوع؛ كي أبيِّنَ الكيفية التي تطوَّر بها، والكيفية التي جمع بها بين العديد من المناحي المفاهيمية على مَرِّ مسيرته، والكيفية التي مهَّدت بها التحسينات التكنولوجية طرقًا جديدة في الاستكشاف.

هذا وقت ملائم لتأليف كتاب من هذا النوع. فالإجماع المتزايد حول شكل وتوزيع المادة والطاقة في الكون يوحي بأن الفهم الكامل لكل ما في الكون قد صار في المتناول. لكن تظل أمامنا ألغاز مثيرة، ومن الدروس التي علَّمَنا التاريخ إياها أنه ينبغي لنا أن نتوقع حدوث مفاجآت!

الفصل الأول

# تاريخ موجز

علم الكونيات فرع حديث العهد نسبيًّا من العلوم الطبيعية. وفي هذا شيء من التناقض؛ لأن علم الكونيات يتناول بعضًا من أقدم الأسئلة التي طرحتها البشرية على غرار: هل الكون غير محدود؟ هل هو موجود منذ الأزل؟ وإذا كان الجواب بالنفي، فكيف ظهر الكون إلى الوجود؟ وهل سينتهي يومًا ما؟ ومنذ أزمنة ما قبل التاريخ والبشرُ يسعَون إلى بناء إطار مفاهيمي من نوعٍ ما للإجابة على الأسئلة المتعلقة بالعالم وبعلاقتهم به. كانت أُولى تلك النظريات، أو النماذج، عبارة عن خرافات ننظر إليها اليوم بوصفها ساذجة أو عديمة المعنى. بَيْدَ أن هذه التخمينات البدائية تُظهر الأهميةَ التي طالما نسبناها نحن البشرَ إلى التفكير في العالم. واليوم، يستخدم علماء الكونيات لغة ومنظومة من الرموز مختلفتين تمامًا، لكن ما يحفِّزهم بالأساس هو نفس ما حفَّز أسلافنا القدماء. وأَوَدُّ في هذا الفصل أن أسرد في إيجازٍ التطورَ التاريخيَّ لـ «موضوع» علم الكونيات، وأن أفسِّر الكيفية التي تطورت بها بعض أفكاره المحورية. وآمُل أن يوفر هذا نقطة انطلاق مفيدة نحو الفصول التالية التي سأستكشف فيها هذه الأفكار المحورية بمزيد من التفصيل.

## الكون في الخرافات

أغلب المحاولات القديمة لدراسة الكون كانت مبنيةً بالأساس على شكل من أشكال التجسيم (أي نسبة الصفات البشرية إلى كائنات غير بشرية). وقد تضمنت بعض هذه المحاولات فكرة أن العالم المادي تُحَرِّكه كيانات ذات إرادة نافذة يمكنها أن تساعد البشرية أو تعوقها، فيما تضمَّن البعض الآخر فكرة أن العالم المادي نفسه جامد، ولكن يمكن لإله

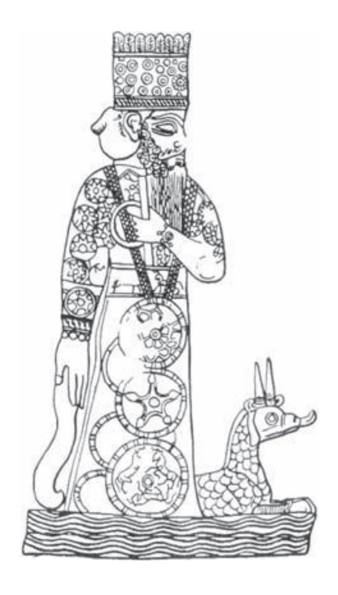
أو آلهة أن يتحكموا في مساره. في كلتا الحالتين تميل خرافات الخلق إلى عَزْوِ منشأ الكون إلى كيانات يمكن تفهُّم دوافعها — ولو جزئيًّا — من جانب البشر.

ثمَّة اختلافات كثيرة بين خرافات الخلق حول العالم، لكنْ هناك أيضًا أوجه تشابه لافتة. على سبيل المثال، عادةً ما تتضمن هذه الخرافات فكرة الحِرَفي الأسمى، وبذا يُقدَّم جمال العالم الطبيعي بوصفه صنيعة يد فنان ماهر، وثمَّةَ أمثلة على هذا في جميع الثقافات. وهناك صورة متكررة أخرى؛ هي نمو التنظيم من الفوضى، والتي تعكس التنظيم المتصاعد للمجتمع البشري. أيضًا هناك صورة مشابهة تمثِّل الكون بوصفه عملية بيولوجية، وأبرز الأمثلة على ذلك موجود في الخرافات التي تصوِّر الكونَ على أنه نشأ من بيضة أو بذرة.

تحتوي قصة الخلق البابلية — المعروفة باسم إنوما إليش — هذه العناصر. ترجع هذه الخرافة إلى حوالي عام ١٤٥٠ قبل الميلاد، لكنها مبنية على الأرجح على روايات سومرية أخرى أقدم. في قصة الخلق هذه تتجسَّد حالة الفوضى البدائية في البحر، ومن البحر تنشأ آلهةٌ تمثِّل المكونات الأساسية للعالم؛ كالسماء والأفق وغيرهما. من بين تلك الكيانات الإلهية يتصارع الإله مردوخ مع الإلهة تيامات — ربة البحر — ويصرعها، ويشكِّل مردوخ الأرضَ من جسدها.

الصين أيضًا مصدر لعدد من التفسيرات المثيرة للاهتمام، وأحد هذه التفسيرات يتضمَّن العملاق بان جو. في هذه القصة بدأ الكونُ كبيضة عملاقة. ظل العملاق نائمًا داخل البيضة لآلاف السنين، ثم استيقظ وتحرَّر محطِّمًا البيضة خلال ذلك. بعض أجزاء البيضة (الأخف والأكثر طُهرًا) ارتفعت مكوِّنةً السموات، بينما الأجزاء الأثقل والأدنس كوَّنت الأرضَ. حمل بان جو السموات بيديه، بينما ارتكزت قدماه على الأرض. ومع ارتفاع السموات أكثر وأكثر، صار العملاق أطول وأطول؛ كي يُبقي على اتصالها بالأرض. وفي النهاية مات بان جو، لكن أجزاء جسده استُخدمت على نحوٍ مفيد؛ إذ صارت عينه اليسرى الشمسَ، وعينه اليمنى القمرَ، وصار عَرَقه المطرَ، وشعره النباتاتِ، وصارت عظامه الصخورَ.

تتعدد أساطير الخلق بتعدد الثقافات، ولا أملك المساحة الكافية هنا لذكر المزيد من التفاصيل. وسواء أكانت الأساطير أفريقية أم آسيوية أم أوروبية أم أمريكية، فمن المدهش كيفية تَشارُكها في العديد من أوجه الشبه.



شكل ١-١: الإله البابلي مردوخ. يُنسب إلى مردوخ فضل فرض النظام الكوني بعد أن دمَّر تيامات؛ التي تُجسِّد الفوضى البدائية، والتي تَظهر في الشكل عند قدميه على صورة تنين ذي قرنين. أساطير عديدة حول العالم تتضمَّن فكرة نشوء النظام من رحم الفوضى، ويظل هذا المفهوم حاضرًا في بعض الدراسات الكونية العلمية الحديثة.

## الإغريق

تعود جذور العلم الحديث إلى بلاد اليونان القديمة. بطبيعة الحال كان للإغريق آلهتهم وخرافاتهم، وكان الكثير منها مُستقًى من ثقافات مجاورة. لكن إلى جانب هذه العناصر التقليدية بدأ الإغريق في تأسيس نظام من مبادئ البحث العلمي، وكانوا هم مَن أرسَوُا العلاقة بين السبب والنتيجة، التي لا تزال مكوِّنًا جوهريًّا للنظريات العلمية في وقتنا الحالي. كما أنهم أدركوا أن توصيف الظواهر المرصودة وتفسيرها يمكن صياغتهما بصورة رياضية أو هندسية، بدلًا من الاعتماد على مفهوم التجسيم.

بدأت دراسة الكون في الظهور كمجال علمي قابل للتمييز ضمن الإطار الكامل للفكر العقلاني الذي أرساه الإغريق، وأبرزهم طاليس (٦٢٥–٥٤٧ق.م) وأناكسيماندر

(٦١٠–٥٤٠ق.م). ومصطلح علم الكونيات Cosmology مشتق في اللغة الإنجليزية من كلمة cosmos الإغريقية التي تعني العالَم بوصفه منظومة مرتَّبة أو كاملة. والتركيز هنا على التنظيم والترتيب مثلما هو على الكمال؛ إذ إن مقابل «الكون» لدى الإغريق هو «الفوضى». وقد نظر الفيثاغوريون في القرن السادس قبل الميلاد إلى الأرقام والهندسة بوصفهما أساس كل الأشياء الطبيعية. ومثَّل استحداث التفكير المنطقي الرياضي، وفكرة أن بمقدور المرء اكتساب المعرفة عن العالم الطبيعي باستخدام المنطق والتفكير؛ بدايةَ الحقبة العلمية. كما قدَّم أفلاطون (٤٢٧–٣٤٨ق.م) تفسيرًا كاملًا لخلق الكون، يقوم — وَفقًا له — ربٌّ سامٍ بخلق تجسيدات غير مثالية في عالمنا المادي للبِنى الصافية المثالية الموجودة فقط في عالم الأفكار. فالعالم المادي عرضة للتغيير، بينما عالم الأفكار خالد وغير قابل للتغيير.

توسع أرسطو (٣٨٤–٣٢٢ق.م) — تلميذ أفلاطون — في هذه الأفكار؛ بحيث قدَّم صورة للعالم تتحرك فيها النجوم والكواكب البعيدة في حركة دائرية تامة، في دوائر هي تجسيد للهندسة «الإلهية». إنَّ الكون لدى أرسطو هو كرة تقع الأرض في مركزها. والجزء الممتد من الكرة ما بين الأرض والقمر هو نطاق التغيير، أو الواقع غير المثالي لأفلاطون، أما ما وراء ذلك فتمارس الأجرام السماوية حركاتها الدائرية المثالية. وقد هيمنت هذه النظرة للكون على الفكر الغربي خلال العصور الوسطى، لكن الحركات الدائرية التامة لم تتوافق مع البيانات الفلكية المتزايدة التي جمعها الإغريق من الأرشيفات التاريخية التي تركها البابليون والمصريون القدماء. ورغم أن أرسطو أكَّد إمكانيةَ تعلُّم المزيد عن الكون عن طريق الملاحظة بالإضافة إلى التفكير الخالص، فإنه لم تتِمَّ صياغة نموذج رياضي كامل للكون يتفق مع كل البيانات المتاحة إلا حين وضع بطليموس كتابه «المجسطي» في القرن الثاني بعد الميلاد.

## عصر النهضة

خلال العصور المظلمة، لم تكن الثقافة المسيحية على معرفة بمعظم المعارف التي اكتسبها الإغريق، بَيْدَ أن هذه المعارف ازدهرت في العالم الإسلامي. ونتيجة لذلك، كان التفكير المرتبط بدراسة الكون في أوروبا محدودًا خلال العصور الوسطى. وقد استفاد توما الأكويني (١٢٢٥–١٢٧٤) من أفكار أرسطو التي كانت ترجمتها اللاتينية متاحة وقتها

— على العكس من كتاب «المجسطي» — في صياغة مزيج من علم الكونيات الوثني وعلم اللاهوت المسيحي هيمن على الفكر الغربي حتى القرنين السادس عشر والسابع عشر.

عادةً ما يُعزى تقويض النظرة الأرسطية للعالم إلى نيكولاس كوبرنيكوس (١٤٧٣–١٥٤٣). كان كتاب «المجسطي» لبطليموس نظرية كاملة، بَيْدَ أنه تضمَّن تطبيق معادلات رياضية متباينة لوصف حركة كل كوكب، ومِن ثَمَّ لم يكن يمثِّل في واقع الأمر نظامًا موحَّدًا. ففي جوهره، وصف هذا الكتاب ظواهر الحركة السماوية، لكنه لم يفسِّرْها. أراد كوبرنيكوس أن يشتق نظرية عامة موحدة تتعامل مع كل شيء على الأساس عَيْنِه. وقد حقق كوبرنيكوس هذا على نحو جزئي وحسب، لكنه نجح في إزاحة الأرض عن مركز المنظومة الكونية. ولم يتحقق التقويض الناجح تمامًا للمنظومة الأرسطية إلا مع مجيء يوهانز كبلر (١٥٧١–١٦٣٠)؛ إذ استبدل كبلر — مدفوعًا بالحاجة إلى تفسير المشاهدات البالغة الدقة لحركة الكواكب التي أجراها تيكو براهي (١٥٤٦–١٦٠١) — بمدارات أرسطو الدائرية الإلهية قطوعًا ناقصة.

تمثَّل التطور العظيم التالي على الطريق نحو التفكير العلمي الحديث في دراسة الكون في ظهور إسحاق نيوتن (١٦٤٢–١٧٢٧) على الساحة. تمكَّن نيوتن من أن يُبيِّن في كتابه البارز «المبادئ» (١٦٨٧) أن الحركة الإهليجية التي توصَّل إليها كبلر إنما هي نتيجة طبيعية لوجود قانون كوني عام للجاذبية. وبذا أعاد نيوتن إرساء مستوًى أفلاطوني من الواقع؛ ذلك العالم المثالي من القوانين الكونية العامة للحركة. فالكون، حسب تصور نيوتن، يسير كآلة عملاقة، تؤدِّي الحركات المنتظمة التي يفرضها الخالق الأعظم، وما المكان والزمن إلا تجسيدان مطلقان للخالق الباطن ذي الوجود الكُلي.

ظلت أفكار نيوتن مهيمنة على التفكير العلمي حتى بداية القرن العشرين، لكن منذ القرن التاسع عشر بدأت العيوب تعتري الآلة الكونية. كانت النظرة الميكانيكية للعالم قد ظهرت إلى الوجود إلى جانب أولى تباشير التكنولوجيا. وخلال الثورة الصناعية التالية صار العلماء منشغلين بنظريات المحركات والحرارة. وقد بيَّنتْ قوانين الديناميكا الحرارية هذه أنه ليس بمقدور أي محرِّك أن يعمل على نحوٍ مثالي إلى الأبد دون أن يُستنزَف. وفي ذلك الوقت شاع الإيمان بـ «الموت الحراري للكون»، وهي الفكرة التي تقضي بأن الكون ككلٍّ سيُخمد ويموت، تمامًا مثلما تفقد الكرة القافزة طاقتها وتستكين حركتها.

## نحو الحقبة الحديثة

طرح أولبرز (١٧٥٨–١٨٤٠) تحديًا آخر أمام فكرة المحرك الكوني لنيوتن، وذلك حين صاغ في عام ١٨٢٦ مفارقة لا تزال تحمل اسمه، رغم أن آخرين قبله طرحوها، مِن بينهم كبلر. تظهر «مفارقة أولبرز» عند تدبر سبب كون السماء مظلمة في الليل. ففي الكون اللانهائي الثابت الأبدي، من المفترض أن يوجد أحد النجوم على امتداد كل خط من خطوط البصر أينما نظرنا، تمامًا مثلما يجد خط البصر الممتد عبر غابة لا نهائية شجرةً في نهاية المطاف. يستتبع هذا أن سماء الليل ينبغي أن تكون ساطعة مثل سطوع أي نجم عاديٍّ. والظلمة المُدرَكة بالليل تكفي لإثبات أن الكون يستحيل أن يكون لا نهائيًّا وأبديًّا.

لكن سواء أكان الكون لا نهائيًّا أم لا، فقد زاد على نحو مطَّرِد الجزء القابل للتفسير المنطقي منه. بالنسبة إلى أرسطو، كان مدار القمر (٤٠٠ ألف كيلومتر فقط) يمثِّل حدًّا أساسيًّا، لا يستطيع العقل البشري تجاوزه. أما بالنسبة إلى كوبرنيكوس وكبلر، فتمثَّل هذا الحدُّ في حافَة المجموعة الشمسية (على بعد مليارات الكيلومترات). وبحلول القرنين الثامن عشر والتاسع عشر، اقتُرِح أن مجرة درب التبانة، تلك المنظومة التي نعرف الآن أنها أكبر من المجموعة الشمسية بمليارات المرات، هي الكون بأسره. لكن كانت هناك فكرة أخرى منافِسة لهذه الفكرة، وهي أن «السُّدُم» الحلزونية الغريبة التي اكتُشفت متناثرة في أرجاء السماء إنما هي أجرام مشابهة لمجرة درب التبانة، ولكننا ننظر إليها من مسافة بعيدة. ولاحقًا صار يطلق على هذه الأجرام اسم «مجرات». وقد نشب «جدال عظيم» في السنوات الأولى من القرن العشرين بين أنصار هاتين الفكرتين المتناقضتين، وهو ما سأطرحه في الفصل الرابع. لكن بفضل إدوين هابل (١٨٨٩–١٩٥٣) صار معروفًا الآن أن مجرة درب التبانة هي بالفعل محض مجرة واحدة من مئات المليارات من المجرات الشبيهة بها.

بدأت الحقبة الحديثة لعلم الكونيات في السنوات الأولى من القرن العشرين، حين حدثت عملية إعادة صياغة كاملة لقوانين الطبيعة. طرح ألبرت أينشتاين (١٨٧٩–١٩٥٥) مبدأ النسبية في عام ١٩٠٥، وبذا قوَّض مفهوم نيوتن عن المكان والزمن. ولاحقًا، حلت نظرية النسبية العامة التي طرحها أيضًا محل قانون الجذب العام لنيوتن. وقد صاغت الدراسات الكونية العظيمة الأولى القائمة على مفهوم النسبية على يد كلٍّ من فريدمان (١٨٨٨–١٩٢٥) ولومِتر (١٨٩٤–١٩٦٦) ودي سيتر (١٨٧٢–١٩٣٤) لغةً جديدة معقَّدة من أجل التوصيف الرياضي للكون. وتلعب نظرية أينشتاين دورًا مفاهيميًّا

كبيرًا للغاية في علم الكونيات الحديث لدرجة أنني سأخصص السواد الأعظم من الفصل القادم لها.

لكن رغم أن هذه التطورات المفاهيمية قد مهدت الطريق، فإن الخطوات النهائية نحو الحقبة الحديثة لعلم الكونيات لم يضطلع بها الفيزيائيون النظريون، بل علماء الفلك القائمون على عمليات الرصد. ففي عام ١٩٢٩، نشر إدوين هابل — الذي كان قد أوضح حديثًا أن الكون يحتوي على العديد من المجرات الشبيهة بمجرة درب التبانة — المشاهدات التي أدَّت بنا إلى الاعتقاد بأن الكون آخِذٌ في التمدد. وأخيرًا، في عام ١٩٦٥، اكتشف بنزياس وويلسون إشعاع الخلفية الميكروني الكوني الذي يُعَدُّ دليلًا دامغًا (أو شبه دامغ، حسبما قد تراه) على أن الكون بدأ بِكُرَة نارية بدائية؛ أي «الانفجار العظيم».

## علم الكونيات اليوم

بدأت الحقبة الحديثة من الدراسة العلمية للكون مع نظرية النسبية العامة لأينشتاين، المنشورة عام ١٩١٥، والتي مكَّنتْنا من عمل توصيف رياضي متَّسق للكون بأسره. وفق نظرية أينشتاين، ترتبط خصائص المادة والحركة بتشوُّه المكان والزمن. وأهمية هذا لعلم الكونيات هي أن المكان والزمن لم يعد يتم التفكير فيهما بوصفهما شيئين مطلقين منفصلين عن الأجسام المادية، بل بوصفهما مشاركَيْنِ في تطور الكون. لا تُمَكِّننا النسبية العامة من فهم منشأ الكون «في داخل» المكان والزمن، وإنما تمكِّننا من فهم أصل المكان والزمن نفسيهما.

تشكل نظرية أينشتاين أساس نموذج الانفجار العظيم الحديث، الذي ظهر بوصفه أفضل التفسيرات المتاحة لتمدد الكون. ووفق هذا النموذج، المكان والزمن والمادة والطاقة كلها ظهرت إلى الوجود في صورة كرة نارية من المادة والإشعاع ذات درجة حرارة وكثافة قُصْوَيَيْنِ منذ حوالي ١٥ مليار عام. وبعد الانفجار العظيم ببضع ثوانٍ، انخفضت درجة الحرارة إلى عشرة مليارات درجة فقط، وبدأت التفاعلات النووية في تكوين الذرات التي تتكون منها أجسامنا. وبعد حوالي ٣٠٠ ألف عام انخفضت الحرارة حتى بضعة آلاف درجة مئوية، محررة الإشعاع الذي نرصده اليوم بوصفه إشعاع الخلفية الميكروني الكوني. ومع تمدد هذا الانفجار، حاملًا المكان والزمن معه، بَرُدَ الكون وخفَّتْ كثافته. وقد تكوَّنت النجوم والمجرات عن طريق تكثُّف السحب المتمددة من الغاز والإشعاع. ويحتوي كوننا اليوم على الرماد والدخان المتخلِّفَين عن الانفجار العظيم.

يصف الفصل الخامس نظرية الانفجار العظيم بمزيد من التفصيل. وأغلب علماء الكونيات يتقبلون هذه النظرية بوصفها صحيحة في جوهرها، رغم وجود بعض التفاصيل غير المحسومة. وهذه النظرية تفسِّر أغلب ما نعرفه اليوم من خصائص للمادة الكثيفة في الكون، ويمكنها تفسير أغلب المشاهدات الكونية ذات الصلة. لكن من المهم أن ندرك أن نظرية الانفجار العظيم ليست كاملة، وأغلب الأبحاث الحديثة في علم الكونيات تدفعها الرغبة في سد الفجوات الموجودة في هذا الإطار العام المقنع.

من أمثلة تلك الفجوات أن نظرية أينشتاين نفسها تنهار في الزمن التالي مباشرة لبداية الكون. فالانفجار العظيم مثال لما يطلِق عليه منظِّرو النسبية اسم «نقطة التفرد»، وهي نقطة تفشل عندها كل النماذج الرياضية وتصير كل القيم القابلة للقياس لا نهائية. ورغم أننا نعرف الكيفية التي يُتوقع أن يتطور بها الكون من أي مرحلة بعينها، فإن نقطة التفرد تجعل من المستحيل أن نعرف من الافتراضات الأولى للنظرية الشكلَ الذي كان الكون عليه في البداية. ولهذا علينا أن نربط هذا بالمشاهدات بدلًا من الفكر المجرد، شأن علماء الآثار الذين يحاولون إعادة بناء مدينة بائدة اعتمادًا على الأطلال. ومِن ثَمَّ يعكف علماء الكونيات في وقتنا هذا على جمع كميات هائلة من البيانات التفصيلية؛ حتى يحاولوا ربط كل هذه البيانات معًا من أجل رسم صورة للكيفية التي بدأ بها الكون.

عزَّزت التطورات التكنولوجية التي شهدناها على مر العشرين عامًا الماضية وتيرةَ التقدم في علم الكونيات الرصدي، ونحن الآن بالفعل في «عصر ذهبي» من الاكتشافات الكونية. يتضمن علم الكونيات الرصدي الآن بناء خرائط هائلة لتوزيع المجرات في الفضاء، تُبيِّن البنية المذهلة الواسعة النطاق للخيوط والألواح المجرِّية. وعمليات المسح هذه تُكملها مشاهدات عميقة يجري عملها، على سبيل المثال، بواسطة تليسكوب هابل الفضائي. التُقطت صورة «حقل هابل العميق» بفترة تَعرُّض طويلة للغاية لدرجة أنها تَعرِض مجرات على مسافات هائلة للغاية، حتى إن الضوء الصادر عنها استغرق غالبية عمر الكون حتى يصل إلينا منها. وباستخدام مشاهدات كهذه يمكننا رؤية التاريخ الكوني وهو يتكشف أمام أعيننا. على سبيل المثال، صار علماء الفلك الذين يستخدمون الإشعاع الميكروني في دراستهم للكون الآن قادرين على عمل صور لِبِنْيَة الكون المبكر عن طريق رصد التموجات في إشعاع الخلفية الميكروني الكوني، التي أُنتجت في كرة النار البدائية. وسوف تَستكشِفُ تجاربُ مخطَّطٌ لها تُجرَى باستخدام الأقمار الصناعية — على غرار «مسبار قياس تباين الأشعة الكونية» و«مرصد بلانك الفضائي» — هذه التموجاتِ بمزيد

من التفصيل عبر السنوات القليلة القادمة، ومن المفترض أن تسد النتائج التي ستأتي بها العديدَ من الفجوات في فهمنا الحالي للكيفية التي يتشكل بها الكون.

من الممكن استخدام المشاهدات الكونية في قياس معدل التمدد الكوني، وتبيُّن الكيفية التي يتغير بها هذا المعدل مع مرور الوقت، وأيضًا استكشاف هندسة المكان عن طريق تطبيق مبادئ التثليث على مستوى هائل. وفق نظرية أينشتاين، لا تتحرك أشعة الضوء في خطوط مستقيمة بالضرورة؛ وذلك لأن المكان يتشوه بفعل جاذبية الأجرام الضخمة. وعبر المسافات الكونية من الممكن أن يتسبب هذا التأثير في انغلاق الزمكان على نفسه (كسطح الكرة) مسببًا تلاقيَ أشعة الضوء المتوازية. كما يمكن أن يُنتج كونًا «مفتوحًا» تبتعد فيه أشعة الضوء بعضها عن بعض. وبين هذين البديلين هناك الفكرة «المعتادة» الخاصة بالمكان المنبسط الذي تنطبق فيه قوانين الهندسة الإقليدية. ويعتمد كَون أيٍّ من هذه البدائل هو البديلَ الصحيحَ على الكثافة الإجمالية للمادة والطاقة في الكون، وهو ما لا تستطيع نظرية الانفجار العظيم وحدها التنبؤ به.

تعرضت نظرية الانفجار العظيم لفحص نظري دقيق في أوائل ثمانينيات القرن العشرين، حين اتخذ فيزيائيو الجسيمات علمَ الكونيات سبيلًا لمحاولة فهم خصائص المادة عند نطاقات الطاقة العالية للغاية التي لا تستطيع معجلات الجسيمات الخاصة بهم الوصول إليها. وقد أدرك هؤلاء المنظِّرون أن الكون المبكر مرَّ على الأرجح بسلسلة من التحولات الجذرية المعروفة باسم «التحولات الطورية»، تسارَع خلالها معدل تمدده بمعامل ضخم للغاية في كسر بسيط من الثانية الواحدة. ومن المفترض أن حقبة «التضخم» هذه هي التي سببت انبساط المكان المنحني، وهو ما يُفضي إلى تنبؤ محدد يقضي بأن الكون ينبغي أن يكون منبسطًا. يبدو هذا متفقًا مع عمليات المسح الكوني المذكورة سابقًا. أما المقترحات الحديثة التي تطرح أن معدل تمدد الكون قد يكون متسارعًا فتفترض وجود طاقة مظلمة غامضة قد تكون أثرًا باقيًا لحقبة التضخم المبكرة.

أيضًا، استعان علماء الكونيات بالحاسبات الفائقة الحديثة في محاولة فهم كيفية تكتُّف كُتَل المادة الكونية على صورة نجوم ومجرات، بينما الكون آخِذ في التمدد والبرودة. وقد أشارت هذه الحسابات إلى أن هذه العملية تتطلب وجود تركيزات هائلة من مادة عجيبة، كثيفة بما يكفي بحيث تساعد في نمو البنية، لكنها مع ذلك لا تنتج أي ضوء نجمي. وهذه المادة غير المرئية تسمى المادة المظلمة. وتتفق التنبؤات الحاسوبية للبنية المتكونة مع الخرائط الضخمة التي أنتجها الراصدون، وهو ما يجعل نظرية الانفجار العظيم تحظى بمزيد من الدعم.

إن التفاعل المتبادَل بين هذه الأفكار النظرية الجديدة وبين البيانات الرصدية الجديدة العالية الجودة دَفَعَ علم الكونيات قُدمًا من النطاق النظري البحت إلى مجال العلوم التجريبية الصارمة. وهذه العملية بدأت مع بداية القرن العشرين، مع إسهامات ألبرت أينشتاين.

الفصل الثاني

# أينشتاين وكُلُّ ما قدمه

كلنا يعي تأثيرات الجاذبية؛ فالأشياء تسقط إلى الأرض حين نُفلتها، كما يكون صعود التلِّ جريًا أكثرَ صعوبة من هبوطه. لكن في نظر الفيزيائيين تشمل الجاذبية ما هو أكثر من التأثيرات التي نستشعرها في حياتنا اليومية. على سبيل المثال، كلما كبر حجم الأجسام محل الدراسة، زادت الجاذبية أهميةً. فالجاذبية تجعل الأرض تدور حول الشمس، وتجعل القمر يدور حول الأرض، وتتسبب في تأثيرات المد والجزْر. وعلى نطاق الأجسام ذات الصلة بعلم الفلك، تُعَدُّ قوة الجاذبية هي المحرِّك الرئيس. لذا إن أردتَ فهْم الكون إجمالًا؛ فعليك بفهم الجاذبية.

## قوة الجذب الكونية

الجاذبية واحدة من القوى الأربع الأساسية في الطبيعة. وهي تمثِّل مَيلًا عامًّا لدى المادة بكل أشكالها إلى جذب كل أشكال المادة الأخرى. في الواقع، هناك أربع قوًى أساسية في الطبيعة (الجاذبية، والقوة الكهرومغناطيسية، والقوة النووية «القوية»، والقوة النووية «الضعيفة»). إن عمومية وانتشار قوة الجاذبية يُميِّزانها عن القوى الكهربية بين الأجسام المشحونة مثلًا. فالشحنات الكهربية يمكن أن تكون إما موجبة وإما سالبة، ورغم أنه من الممكن أن تؤدي القوى الكهربية إلى التجاذب (بين الشحنات المتباينة) أو التنافر (بين الشحنات المتشابهة)؛ فإن الجاذبية قوة جاذبة طوال الوقت. ولهذا السبب تمثل الجاذبية هذه الأهمية لعلم الكونيات.

من أوجه عدة، تعد قوة الجاذبية ضعيفة للغاية؛ فأغلب الأجسام المادية تتماسك أجزاؤها بفعل القوى الكهربية بين ذراتها، وهذه القوى أقوى أضعافًا مضاعفة من قوى

الجاذبية الموجودة بين هذه الأجسام والأجسام الأخرى. لكن رغم ضعف الجاذبية فإنها هي القوة المحركة في المواقف الفلكية؛ لأن الأجرام السماوية — باستثناءات قليلة للغاية — تحتوي دائمًا على المقدار عينه من الشحنتين الموجبة والسالبة؛ ومِن ثَمَّ لا تمارس أية قوى ذات طبيعة كهربية بعضها في بعض.

أحد أوائل إنجازات الفيزياء النظرية هو نظرية الجذب العام لنيوتن، التي وحَّدتْ ما كان وقتها يبدو عددًا متفرقًا من الظواهر الفيزيائية. وتُلخِّص ثلاثة قوانين بسيطة نظريةَ نيوتن للحركة، وهي:

(١) يظل الجسم على حالته الحركية، إما السكون التام أو الحركة في خط مستقيم بسرعة ثابتة، ما لم تؤثر فيه قوة تُغيِّر من هذه الحالة.

(٢) إذا أثرت قوة محصلة في جسم أكسبتْه تسارعًا، يتناسب مقداره تناسبًا طرديًّا مع مقدار القوة المحصلة، ويكون اتجاهه في اتجاه القوة المحصلة نفسها.

(٣) لكلِّ قوةِ فعلٍ قوةُ ردِّ فعلٍ، مساوية لها في المقدار ومضادة في الاتجاه.

قوانين الحركة الثلاثة هذه قوانين عامة، تنطبق بالدقة عينها تقريبًا على سلوك الكُرَات على طاولة البلياردو مثلما تنطبق على حركة الأجرام السماوية. كل ما كان نيوتن بحاجة له هو التوصل إلى كيفية وصف قوة الجاذبية. وقد أدرك نيوتن أن الجسم الذي يدور في مدار دائري، كالقمر الذي يدور حول الأرض، يبذل قوة في اتجاه مركز الحركة (تمامًا مثلما يفعل الثقل المربوط في طرف خيط حين يلفه المرء حول رأسه). ويمكن أن تسبب الجاذبية هذه الحركة بالطريقة نفسها التي تسبب بها سقوط التفاح من الأشجار إلى سطح الأرض. في كلا هذين الموقفين لا بد أن تكون الحركة متجهة نحو مركز الأرض. وقد أدرك نيوتن أن الصيغة الصحيحة من المعادلة الرياضية هي قانون «تربيع عكسي» يقضي بأن «قوة الجذب بين أي جسمين تعتمد على محصلة كُتلتَيْ هذين الجسمين وعلى مربع المسافة بينهما.»

وقد تحقق انتصار نظرية نيوتن، المبنية على قانون التربيع العكسي للجذب العام، حين تمكنت هذه النظرية من تفسير قوانين الحركة الكوكبية التي وضعها يوهانز كبلر قبل أكثر من قرن مضى وقتها. وقد كان هذا النجاح عظيمًا لدرجة أن فكرة الكون الذي يسير وفقًا لقوانين نيوتن للحركة هيمنت على التفكير العلمي لأكثر من قرنين تاليين، إلى أن ظهر أينشتاين على الساحة.

## ثورة أينشتاين

وُلد ألبرت أينشتاين في مدينة أولم (في ألمانيا) في الرابع عشر من مارس ١٨٧٩، لكن سرعان ما انتقلت أسرته إلى ميونخ؛ حيث قضى سنوات دراسته. لم يكن أينشتاين في صغره تلميذًا متميزًا، وفي عام ١٨٩٤ هجر التعليم النظامي كليةً حين هاجرت أسرته إلى إيطاليا. وبعد فشله في اجتياز اختبار القبول مرة واحدة، تمكَّن أخيرًا من الالتحاق بالمعهد السويسري للتكنولوجيا في زيوريخ عام ١٨٩٦. ورغم أنه أبلى بلاءً حسنًا في دراسته في زيوريخ، فإنه عجز عن الحصول على وظيفة في أي جامعة سويسرية؛ إذ كان يُعتقد أنه شخص كسول للغاية. وقد ترك الحقل الأكاديمي للعمل في مكتب لبراءات الاختراع في برن عام ١٩٠٢، وهي الوظيفة التي وفرت له راتبًا طيبًا والكثير من وقت الفراغ للتفكير في الفيزياء؛ نظرًا لأن المهام الموكلة لموظف صغير في مكتب براءات الاختراع لم تكن شاقة بالأساس.

نُشرت نظرية النسبية الخاصة لأينشتاين في عام ١٩٠٥، وهي تُعَدُّ أحدَ أعظم الإنجازات العقلية في تاريخ الفكر الإنساني. وما يجعلها أكثر لفتًا للأنظار هو حقيقة أن أينشتاين كان يعمل موظفًا في مكتب براءات الاختراع وقت وضعها، وأنه كان يمارس الفيزياء كهواية، وإن كانت هواية ثقيلة. بل والأدهى أن أينشتاين نشر في العام ذاته بحثين آخرين مبدعين عن التأثير الكهروضوئي (الذي من شأنه أن يلهم لاحقًا العديد من التطورات في نظرية الكم)، وعن ظاهرة الحركة البراونية (أي اهتزاز الجسيمات المجهرية بينما تتقاذفها التصادمات الذرية). لكن السبب الرئيس وراء تميز نظرية النسبية الخاصة عن بقية أعمال أينشتاين في ذلك الوقت، بل وأعمال زملائه في عالم الفيزياء المتعارف عليها، هو أن أينشتاين تمكن من التحرر تمامًا من مفهوم الزمن بوصفه خاصية مطلقة تسير بالمعدل عينه لكل شخص ولكل شيء. فهذه الفكرة جزء لا يتجزأ من الصورة النيوتنية للعالم، وأغلبنا يعتبرها صحيحة على نحو بديهي لدرجة أنها لا تستدعي النقاش من الأساس. وقد تطلب الأمر عبقريًّا حقيقيًّا لتحطيم تلك الحواجز المفاهيمية الضخمة.

لم يكن أينشتاين أول من فكر في مفهوم النسبية. فقد عبَّر جاليليو عن المبدأ الأساسي للنسبية قبله بنحو ثلاثة قرون؛ إذ زعم أن الحركة النسبية وحدها هي التي تهم، وبذا لا يمكن أن يكون هناك وجود لما يسمى الحركة المطلقة. وقد ذهب إلى أنك لو كنت تسافر على متن سفينة ذات سرعة ثابتة على سطح بحيرة هادئة، ما من شأن

أي تجربة تجريها داخل حجيرة مغلقة داخل تلك السفينة أن توحي بأنك تتحرك على الإطلاق. بطبيعة الحال لم يكن الكثير معروفًا عن الفيزياء في عصر جاليليو؛ لذا كانت نوعية التجارب التي تصوَّرها محدودة نوعًا ما.

كل ما فعلتْه نسخة أينشتاين من مبدأ النسبية هو أن حوَّلتْه إلى نص يقضي بأن كل قوانين الطبيعة يجب أن تكون متماثلة تمامًا في نظر كل الراصدين الذين يتحركون حركة نسبية. وتحديدًا، قرر أينشتاين أن هذا المبدأ يجب أن ينطبق على نظرية الكهرومغناطيسية، التي أرساها جيمس كلارك ماكسويل، والتي تصف من ضمن ما تصف القوى العاملة بين الأجسام المشحونة المذكورة سابقًا. ومن تبعات نظرية ماكسويل أن سرعة الضوء (في الفراغ) تبدو على صورة ثابت عام. ويعني تبنِّي مبدأ النسبية بجدِّيَّة أن كل الراصدين يجب أن يقيسوا القيمة عينها لسرعة الضوء، بغَضِّ النظر عن حالة حركتهم. يبدو هذا أمرًا بسيطًا، بَيْدَ أن تبعاته كانت ثورية بكل ما تحمله الكلمة من معنًى.

قرر أينشتاين أن يسأل نفسه أسئلة محددة بشأن ما سيتم رصده في أنواع معينة من التجارب تتضمن تبادلًا لإشارات الضوء. وقد عمل كثيرًا على هذا النوع من التجارب الفكرية. على سبيل المثال، تخيَّلْ أن هناك مصباحًا ضوئيًّا موضوعًا في منتصف عربة سكك حديدية تتحرك على قضيب. في كل طرف من طرفَي العربة هناك ساعة حائط، ونستطيع أن نرى الوقت الذي تسجله كل ساعة حين تضيئها نبضة الضوء الصادرة عن المصباح. حين تنطلق نبضة الضوء من المصباح، تصل الإشارة الضوئية إلى كلا طرفَي العربة في الوقت عينه، وذلك من منظور المسافرين الجالسين داخل العربة. ويُرى الوقت عينه على كل ساعة.

الآن تصور ما يحدث من منظور راصد جالس في سكون على الرصيف يشاهد القطار وهو يعبُر أمامه. تتحرك نبضة الضوء في هذا الإطار المرجعي بنفس سرعة تحركها في نظر المسافرين. لكنَّ المسافرين الموجودين في مؤخرة العربة يتحركون نحو الإشارة، بينما المسافرون الموجودون في مقدمة العربة يتحركون مبتعدين عنها. ومِن ثَمَّ يرى هذا الراصد الساعة الموجودة في مؤخرة عربة القطار قبل أن يرى الساعة الموجودة في مقدمتها. لكن حين تضيء نبضة الضوء الساعة الموجودة في المقدمة، يكون الوقت المسجَّل عليها هو الوقت عينه الذي أظهرتْه الساعة الموجودة في المؤخرة! ومن هنا لا بد أن يستنتج هذا الراصد أنَّ ثمَّة خطأً ما في الساعتين الموجودتين على القطار.

يوضح هذا المثال أن مبدأ التزامن نسبي. فوصول نبضتَيِ الضوء يكون متزامنًا داخل الإطار المرجعي الخاص بالعربة، بَيْدَ أنه يحدث في وقتين مختلفين في الإطار المرجعي الخاص بالراصد الموجود على الرصيف. ومن الأمثلة الأخرى على الظواهر النسبوية العجيبة كلٌّ من الإبطاء الزمني (بمعنى أن الساعة تبدو وكأنها تسير ببطء) وتقلُّص الأطوال (بمعنى أن المساطر المتحركة تبدو أقلَّ طولًا). كل هذه تبعات لافتراض أن سرعة الضوء يجب أن تكون ثابتة في نظر كل الراصدين. بطبيعة الحال الأمثلة المبيَّنة سابقًا غير واقعية إلى حدٍّ ما. فَلِكَي تُحدث السرعات أي تأثيرات ملحوظة، يجب أن تكون قريبة من سرعة الضوء. ومن غير المرجح أن يتم الوصول إلى مثل هذه السرعات في عربات القطار. ومع ذلك، ثمة تجارب أوضحت أن تأثيرات الإبطاء الزمني حقيقية. ومعدل تحلل الجسيمات المشعة يصير أبطأ كثيرًا حين تتحرك على سرعات عالية لأن ساعتها الداخلية تسير على نحوٍ أبطأ.

أنتجت النسبية الخاصة كذلك أشهر معادلة في الفيزياء كلها؛ الطاقة تساوي الكتلة مضروبةً في مربع سرعة الضوء، وهي معادلة تعبِّر عن التكافؤ بين المادة والطاقة. وقد تم التحقق من صحة هذا المبدأ تجريبيًّا، وهو الذي يقف، ضمن مبادئَ أخرى، وراء الانفجارات الذَّرِّيَّة والكيميائية.

لكن رغم روعة النسبية الخاصة فإنها غير كاملة؛ نظرًا لأنها تتعامل فقط مع الأجسام المتحركة بسرعات ثابتة بعضها بالنسبة إلى بعضٍ. لكن حتى الفصل الأول من قوانين الطبيعة، الذي وضعه نيوتن، بُني حول مُسَبِّبات ونتائج السرعات التي تتغير مع مرور الزمن. وقانون نيوتن الثاني يتعلق بمعدل تغير زخم الأجسام، وهو ما يعني بلغة رجل الشارع التسارع أو العجلة. فالنسبية الخاصة منحصرة داخل نطاق ما يسمى الحركة القصورية؛ أي حركات الجسيمات التي لا تؤثِّر فيها قوًى خارجية. وهذا يعني أن النسبية الخاصة لا يمكنها أن تصف الحركة المتسارعة من أي نوع، وتحديدًا لا يمكنها أن تصف الحركة تحت تأثير الجاذبية.

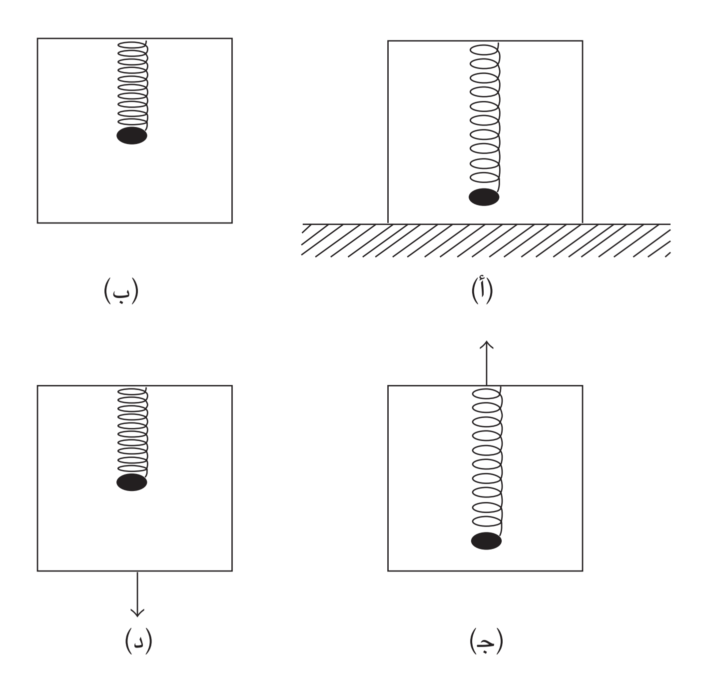
### مبدأ التكافؤ

كان لدى أينشتاين أفكار فَطِنَة بشأن كيفية دمج الجاذبية داخل نظرية النسبية. بادئ ذي بدء، لنتدبر نظرية نيوتن للجاذبية. وفق هذه النظرية فإن القوة الواقعة على جسيم كتلته (ك) بسبب جسيم آخر كتلته (ك١) إنما تعتمد على محصلة هاتين الكتلتين ومربع

المسافة بين الجسيمين. ووفق قوانين نيوتن للحركة فإن هذا يسبب تسارعًا في الجسيم الأول بموجِب المعادلة: القوة تساوي الكتلة مضروبة في التسارع. والكتلة في هذه المعادلة تسمى الكتلة القصورية للجسيم، وهي تحدد مقاومة الجسيم للتسارع. لكن في قانون التربيع العكسي للجاذبية تقيس الكتلة استجابة الجسيم لقوة الجاذبية التي أنتجها الجسيم الآخر، ومِن ثَمَّ يطلق عليها كتلة الجاذبية السالبة. إلا أن قانون نيوتن الثالث ينص أيضًا على أنه لو بذل الجسم (أ) قوة على الجسم (ب)، فإن الجسم (ب) بدوره يبذل قوة على الجسم (أ) تكون مكافئة في المقدار ومضادة في الاتجاه. وهذا يعني أن كتلة الجسيم يجب أيضًا أن تكون كتلة الجاذبية الموجبة (إذا شئت فسَمِّها شحنة الجاذبية) التي ينتجها الجسيم. وفق نظرية نيوتن كل هذه الكتل الثلاث — الكتلة القصورية وكتلتا الجاذبية الموجبة والسالبة — متكافئة. لكن لا يبدو، ظاهريًّا، أنه يوجد سبب يفرض أن يكون الحال كذلك. ألا يمكن أن تكون تلك الكتل مختلفة؟

قرر أينشتاين أن هذا التكافؤ هو نتيجة لمبدأ أعمق أسماه «مبدأ التكافؤ». وهذا يعني — كما عبر عن الأمر بكلماته — أن «جميع المختبرات الساقطة سقوطًا حرًّا والموجودة في نفس الإطار متكافئة من حيث أداء كل التجارب الفيزيائية.» وهو يعني بهذا أنه يمكننا التغاضي عن الجاذبية بوصفها قوة مستقلة من قوى الطبيعة واعتبارها بدلًا من ذلك محض نتيجة للحركة بين الأُطُر المرجعية المتسارعة.

لرؤية الكيفية التي يتحقق بها هذا، تخيل أن هناك مصعدًا يحمل داخله مختبر فيزياء. إذا كان المصعد في حالة سكون على الطابق الأرضي، فستكشف التجارب عن وجود الجاذبية للموجودين بالمصعد. على سبيل المثال، إذا علقنا ثقلًا في زنبرك مثبت إلى سقف المصعد، فسيتسبب الثقل في استطالة الزنبرك إلى الأسفل. بعد ذلك تخيل أننا أخذنا المصعد إلى الطابق العلوي بالمبنى ثم تركناه يسقط سقوطًا حرًّا. داخل هذا المصعد الساقط سقوطًا حرًّا لن تكون هناك أية جاذبية يمكن إدراكها. لن يستطيل الزنبرك؛ لأن الثقل سيسقط بنفس معدل هبوط المصعد، رغم أن سرعة الهبوط قد تكون متغيرة. هذا هو ما سيحدث إذا أخذنا المصعد إلى الفضاء الخارجي، بعيدًا عن مجال الجاذبية لكوكب الأرض. فغياب الجاذبية سيبدو شبيهًا للغاية بحالة السقوط الحر استجابةً إلى قوة جاذبة. علاوة على ذلك، تخيل أن مصعدنا كان في الفضاء بالفعل (وبعيدًا عن مجال الجاذبية)، لكن كان هناك صاروخ مثبت إليه؛ سيتسبب تشغيل الصاروخ في جعل المصعد يتسارع. لا وجود لاتجاهات مثل «أعلى» و«أسفل» في الفضاء، لكن دعنا نفترض




شكل ٢-١: تجربة فكرية توضح مبدأ التكافؤ. ثمة ثقل معلق بزنبرك، والزنبرك مثبت إلى سقف مصعد. في الحالة (أ) المصعد ساكن، لكن قوة الجاذبية تسحب إلى الأسفل، ومِن ثَمَّ يستطيل الزنبرك بفعل الثقل المعلق به. في الحالة (ب) المصعد موجود في الفضاء الخارجي، بعيدًا عن أي مصدر للجاذبية، ولا يتسارع، ومِن ثَمَّ لا يستطيل الزنبرك. في الحالة (ج) لا يوجد مجال جاذبية، لكن المصعد يتسارع إلى الأعلى بواسطة صاروخ، ومِن ثَمَّ يستطيل الزنبرك. التسارع في الحالة (ج) يُنتِج التأثير عينه الذي تُنتِجه قوة الجاذبية في الحالة (أ). في الحالة (د) المصعد يسقط سقوطًا حرًّا في مجال جاذبية، متسارعًا إلى الأسفل بحيث لا يتم استشعار أي جاذبية داخله. لا يستطيل الزنبرك؛ لأنه في هذه الحالة يكون الثقل عديم الوزن ويكون الموقف مكافئًا للحالة (ب).

أن الصاروخ مثبت بحيث يتسارع المصعد في الاتجاه المعاكس للاتجاه السابق؛ أي في اتجاه سقف المصعد.

ما الذي سيحدث للزنبرك؟ الإجابة هي أن التسارع سيجعل الثقل يتحرك في الاتجاه المعاكس لاتجاه حركة المصعد، ومن ثم يستطيل الزنبرك نحو أرضية المصعد. (هذا أشبه بما يحدث حين تتسارع السيارة بغتة؛ إذ تندفع رءوس الركاب إلى الخلف بقوة.) لكن هذا مماثل تمامًا لما حدث حين كان هناك مجال جاذبية يجذب الزنبرك إلى الأسفل. إذا واصل المصعد تسارعه، فسيظل الزنبرك مفرودًا، تمامًا وكأنه ليس خاضعًا للتسارع، وإنما خاضعٌ لتأثير مجال جاذبية. كانت فكرة أينشتاين هي أن هذه المواقف لا تبدو متشابهة وحسْبُ؛ بل تستحيل التفرقة بينها من الأساس. فأي تجربة تؤدَّى في مصعد متسارع في الفضاء ستعطينا نفس النتيجة تمامًا، التي تعطينا إياها تجربة تؤدَّى في مصعد تُبذَل عليه قوة الجاذبية. ولإكمال الصورة، تخيل الآن أن هناك مصعدًا موضوعًا داخل منطقة خاضعة لقوة الجاذبية، لكن يُسمح له بالسقوط الحر في مجال الجاذبية. كل شيء داخل هذا المصعد يصير عديم الوزن، ولن يستطيل الزنبرك. وهذا مكافئ للموقف الذي يكون فيه المصعد في حالة سكون دون أن تؤثر فيه أية قوى جاذبية. ولدى الراصد الذي يسقط سقوطًا حرًّا كل الأسباب التي تدعوه لأن يعتبر نفسه في حالة حركة قصورية.

## نظرية النسبية العامة

بات أينشتاين يعلم حينها كيف يصوغ نظرية النسبية العامة، بَيْدَ أنه احتاج عشر سنوات كي يُخرج النظرية في شكلها النهائي. كان ما عليه أن يجده هو مجموعة من القوانين التي يمكنها التعامل مع أية صورة من صور الحركة المتسارعة وأية صورة من تأثيرات الجاذبية. ولعمل هذا كان عليه أن يتعلم بعض الأساليب الرياضية المعقدة، على غرار التحليل الموتِّر والهندسة الريمانية، وأن يبتكر صيغة شكلية عامة حقًّا بحيث تصف كل الحالات الممكنة للحركة. وقد حقق مبتغاه، لكن من الواضح أن طريقه لم يكن سهلًا. ورغم أن أوراقه البحثية الكلاسيكية التي نشرها عام ١٩٠٥ اتسمتْ بالوضوح الفائق في الفكر وبالاقتصاد في الحسابات الرياضية، فإن أعماله اللاحقة تعج بالصعوبات الفنية. وقد ذهب البعض إلى أن أينشتاين نضج كعالِم أثناء عمله على تطوير النسبية العامة. وإذا كان هذا صحيحًا فلا بد أنها كانت عملية شاقة.

إن فهم التفاصيل الفنية لنظرية النسبية العامة مهمة شاقة بحقٍّ، فحتى على المستوى المفاهيمي من العسير استيعاب هذه النظرية. ونسبية الزمن المجسدة في النسبية

الخاصة حاضرة في النسبية العامة، لكن هناك تأثيرات إضافية للإبطاء الزمني وتقلص الأطوال بسبب تأثيرات الجاذبية. ولا تقتصر المشكلات على الزمن وحده؛ ففي النسبية الخاصة يطيع المكان على الأقل مفاهيمنا التقليدية، لكن في النسبية العامة حتى هذا يتغير؛ إذ يصير المكان منحنيًا.

## انحناء المكان

إن فكرة انحناء المكان أو تقوسه عَصِيَّة للغاية على الاستيعاب، لدرجة أن الفيزيائيين لا يحبون في الواقع تصور الأمر ذهنيًّا. ففَهْمنا للخصائص الهندسية لعالمنا الطبيعي مبني على ما تحقق من إنجازات على يد أجيال من الرياضيين الإغريق، ومن أبرزها نظام إقليدس الشكلي الذي يضم أشياء على غرار نظرية فيثاغورس ومفهوم أن الخطوط المتوازية لا تتقاطع وأن مجموع الزوايا الداخلية للمثلث يساوي ١٨٠ درجة، وما إلى ذلك. كل هذه القواعد جزء من صرح الهندسة الإقليدية. لكن هذه القوانين والنظريات ليست محض رياضيات مجردة. فنحن نعلم من واقع خبرتنا اليومية أنها تصف خواص العالم المادي على نحو طيب للغاية. إن قوانين إقليدس تُستخدم كل يوم من جانب المعماريين والمسَّاحين والمصممين ورسامي الخرائط؛ أي فعليًّا من جانب كل شخص ذي علاقة بخواص شكل المكان وموضع الأجسام فيه. فالهندسة علم واقعي ملموس.

ومِن ثَمَّ، يبدو من البديهي أن هذه الخواص المكانية التي تشرَّبناها منذ الصغر ينبغي أن تنطبق على ما يتجاوز نطاق مبانينا والأراضي التي نمسحها. فمن المفترض أن تنطبق على الكون إجمالًا. ولا بد أن قوانين إقليدس جزء لا يتجزأ من نسيج العالم نفسه. أم الأمرُ خلاف ذلك؟ لكن رغم أن قوانين إقليدس تتَّسم بالأناقة الرياضية والإقناع المنطقي، فإنها ليست المجموعة الوحيدة من القواعد التي يمكن أن تشيِّد نظامًا هندسيًّا. وقد أدرك رياضيون من القرن التاسع عشر، على غرار جاوس وريمان، أن قوانين إقليدس تمثل فقط حالة خاصة من الهندسة يكون فيها سطح المكان منبسطًا. ومن الممكن تشييد أنظمة أخرى يتم فيها خرق هذه القوانين.

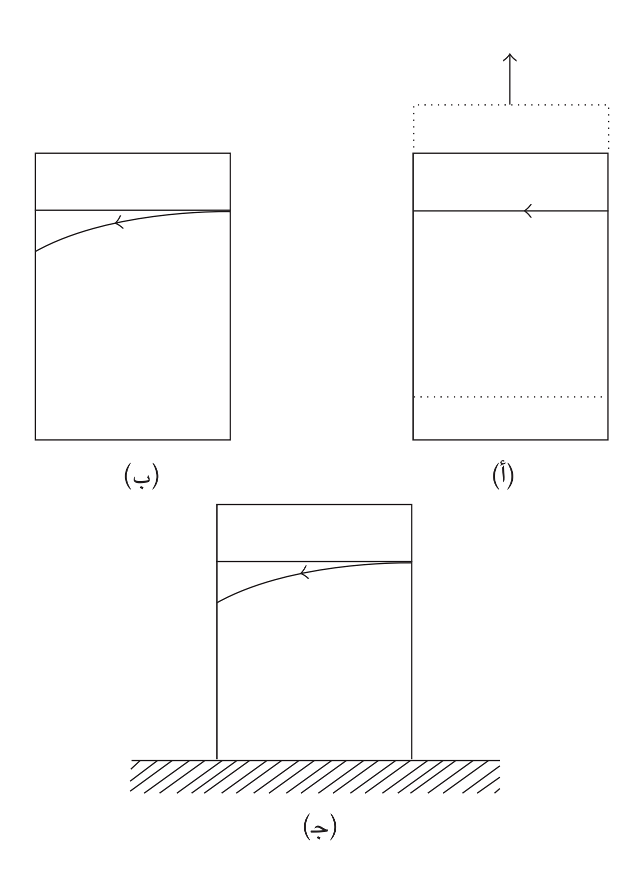
فكِّر، على سبيل المثال، في مثلث مرسوم على ورقة منبسطة. تنطبق نظريات إقليدس على هذه الحالة، وبذا يجب أن يساوي مجموع الزوايا الداخلية للمثلث ١٨٠ درجة (أي ما يعادل مجموع زاويتين قائمتين). لكن فكِّر الآن فيما سيحدث إذا رسمتَ مثلثًا على سطح كرة. فمن الممكن أن ترسم مثلثًا على سطح كرة يكون به ثلاث زوايا قائمة. على

سبيل المثال، ارسُم نقطة عند «القطب الشمالي» ونقطتين عند «خط الاستواء» يفصلهما مساحة تعادل ربع محيط الكرة. هذه النقاط الثلاث تشكِّل مثلثًا ذا ثلاث زوايا قائمة يخالف الهندسة الإقليدية.

هذا النوع من التفكير يصلح على نحو طيب بالنسبة إلى الهندسة ثنائية الأبعاد، لكن عالمنا له ثلاثة أبعاد مكانية. وتخيُّلُ مكانٍ منحَنٍ ثلاثي الأبعاد أمرٌ أكثر صعوبة بكثير. لكن على أي حال من الخطأ على الأرجح التفكير في «المكان» من الأساس. فعلى أي حال، لا يمكننا قياس المكان. بل ما يمكننا قياسه هو المسافات بين الأجسام الواقعة داخل المكان باستخدام المساطر أو، على نحو أكثر واقعية في السياق الفلكي، أشعة الضوء. إن التفكير في المكان بوصفه قطعة ورق منبسطة أو منحنية يشجعنا على التفكير فيه بوصفه شيئًا ملموسًا في حد ذاته، بدلًا من كونه الموضع الذي توجد فيه كل الأشياء الملموسة. وقد حاول أينشتاين دائمًا أن يتجنب التعامل مع كيانات على غرار «المكان» يكون توصيفها كَفِئَة في الوجود غير واضح. وقد كان يفضل أن يفكر بدلًا من ذلك فيما يمكن أن يتوقع الراصد قياسه في أي تجربة بعينها.

احتذاءً بهذا المنظور، يمكننا أن نسأل أنفسنا عن المسار الذي ستتخذه أشعة الضوء وفقًا لنظرية النسبية العامة. في الهندسة الإقليدية ينتقل الضوء في خطوط مستقيمة. وبإمكاننا أن نعتبر انتقالَ الضوء في خطوط مستقيمة يعني بالأساس أن المكان منبسط. في النسبية الخاصة، ينتقل الضوء في خطوط مستقيمة؛ لذا يكون المكان منبسطًا وفق هذه النظرة للعالم. لكن تذكَّرْ أن النسبية العامة تنطبق على الحركة المتسارعة، أو الحركة في وجود تأثيرات جاذبية. فما الذي سيحدث للضوء في هذه الحالة؟

دعونا نَعُدْ إلى التجربة الفكرية التي تتضمن المصعد. وبدلًا من وجود زنبرك معلق في طرفه ثقل، يكون المصعد الآن مزودًا بأداة تطلق شعاعًا من الليزر ينطلق من أحد جوانبه إلى الجانب المقابل له. المصعد موجود في أعماق الفضاء، بعيدًا عن أي جاذبية. إذا كان المصعد ساكنًا، أو يتحرك بسرعة ثابتة، فإن شعاع الضوء المنطلق سيرتطم بالنقطة المقابلة تمامًا للأداة التي أطلقت شعاع الليزر. هذا هو التنبؤ الذي تخرج به النسبية الخاصة. لكن تخيل الآن أن المصعد مثبَّت إليه صاروخ وأن تشغيل الصاروخ سيدفع المصعد إلى التسارع إلى الأعلى. الراصد الساكن الموجود خارج المصعد سيرى هذا المصعد وهو يتسارع في الحركة، لكن إذا رأى شعاع الليزر من الخارج فسيظل في نظره مستقيمًا بالمثل. على الجانب الآخر، سيلاحظ الفيزيائي الموجود داخل المصعد شيئًا




شكل ٢ -٢: انحناء الضوء. في الحالة (أ) يتسارع المصعد إلى الأعلى، كما في الشكل ٢ -١(ج). من منظور خارجي، يسير شعاع الليزر في خط مستقيم. في الحالة (ب)، من منظور داخلي، يبدو أن شعاع الضوء ينحني إلى أسفل. والتأثير عينه يحدث في المصعد الساكن الموجود داخل مجال جاذبية، وهو ما نراه في الحالة (ج).

غريبًا. ففي خلال الفترة الوجيزة التي استغرقها الشعاع في الانتقال من أحد الجانبين إلى الجانب الآخر ستكون حالة الحركة الخاصة بالمصعد قد تغيرت. فقد تسارع المصعد، وبذا صار يتحرك عند نهاية رحلة شعاع الضوء بسرعة أكبر مما كان الحال عند بداية هذه الرحلة. وهذا يعني أن النقطة التي سيرتطم بها شعاع الليزر في الحائط ستكون

في موضع أكثر انخفاضًا بقليل من النقطة التي انطلق منها الشعاع على الجانب الآخر. فمن منظور الراصد الموجود داخل المصعد، تسبب التسارع في «إحناء» شعاع الضوء إلى أسفل.

الآن تذكر حالة الزنبرك ومبدأ التكافؤ. حين لا يوجد تسارع، وإنما يوجد بدلًا منه مجال جاذبية يكون الموقف متشابهًا للغاية من منظور المصعد. تدبَّر الآن حالة مصعد موجود على سطح الأرض. يحدث لشعاع الضوء الأمر عينه تقريبًا الذي حدث في حالة المصعد المتسارع؛ إذ ينحني الضوء إلى أسفل. ومن هذا نخْلُص إلى أن الجاذبية تحني الضوء. وإذا لم تكن مسارات الضوء مستقيمة، بل منحنية، فهذا يعني أن المكان ليس منبسطًا بل منحنيًا.

من أسباب صعوبة استيعاب عقولنا لفكرة المكان المنحني أننا لا نلحظ هذا الأمر في حياتنا اليومية. وهذا يرجع إلى أن الجاذبية تكون ضعيفة في الظروف الشائعة المعتادة. وحتى على نطاق المجموعة الشمسية، تكون الجاذبية ضعيفة لدرجة أن تأثير الانحناء الذي تتسبب فيه لا يُذكَر، وينتقل الضوء في خطوط مقاربة للغاية للخطوط المستقيمة لدرجة أننا لا نلحظ الفارق. تُعَدُّ قوانين نيوتن بمنزلة تقريبات مفيدة للغاية لما يحدث، إلا أن هناك حالات علينا أن نُعِدَّ أنفسنا فيها للتعامل مع الجاذبية القوية ومع كل ما يستتبعه هذا الأمر.

## الثقوب السوداء والكون

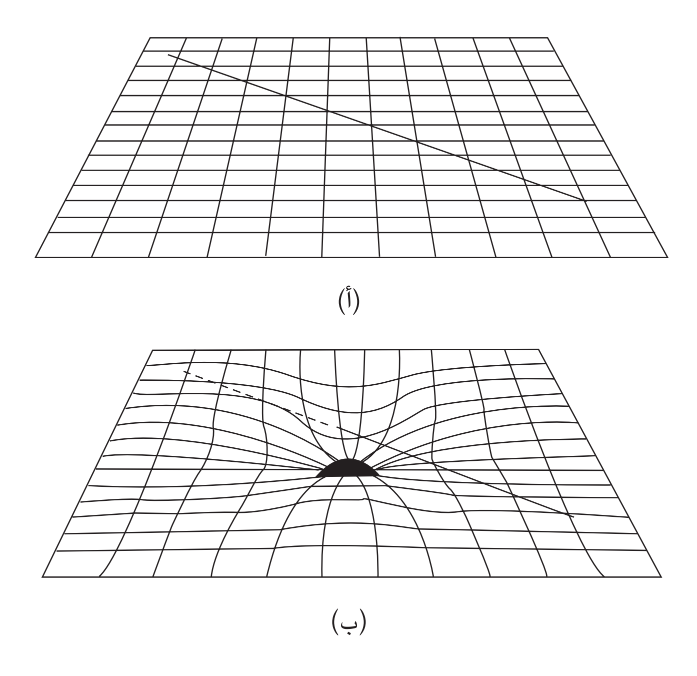
أحد أمثلة المواقف التي تنهار عندها جاذبية نيوتن هو حين يتركز مقدار كبير للغاية من المادة في منطقة صغيرة للغاية من المكان. وحين يحدث هذا يكون تأثير الجاذبية قويًّا للغاية، ويكون المكان منحنيًا للغاية، لدرجة أن الضوء نفسه لا ينثني وحسب بل يُحبَس. ويطلق على جسم كهذا اسم «الثقب الأسود».

ترجع فكرة احتمال وجود الثقوب السوداء في الطبيعة إلى جون ميتشل، القس الإنجليزي، الذي طرحها عام ١٧٨٣، كما ناقشها أيضًا لابلاس. إلا أن هذه الأجسام عادةً ما ترتبط بنظرية النسبية العامة لأينشتاين. في الواقع، كان أحد أوائل الحلول الرياضية لمعادلات أينشتاين يصف هذه الأجسام. فقد تم التوصل إلى حل «شفارتزشيلد» عام ١٩١٦، بعد عام واحد فقط من نشر نظرية أينشتاين، وذلك على يد كارل شفارتزشيلد، الذي تُوُفِّي بعد وقت قصير على الجبهة الشرقية في الحرب العالمية الأولى. يتوافق الحل مع

التوزيع المتناظر كرويًّا للمادة، وكان مقصودًا به في الأساس أن يشكِّل أساسًا لنموذج رياضي لأحد النجوم. لكن سريعًا ما أُدرك أن حل شفارتزشيلد يقضي بوجود نصف قطر حرج (يسمى الآن «نصف قطر شفارتزشيلد») لأي جسم مهما كانت كتلته. وإذا وقع جسم ضخم بالكامل داخل نصف قطر شفارتزشيلد الخاص به، فعندئذٍ لا يستطيع أي ضوء أن يُفلت من سطح هذا الجسم. بالنسبة لكتلة الأرض، يبلغ نصف القطر الحرج سنتيمترًا واحدًا فقط، بينما يبلغ في حالة الشمس ثلاثة كيلومترات. وكي يصل الجسم إلى مرحلة الثقب الأسود لا بد أن تنضغط مادته حتى مستويات كثافة استثنائية.

منذ العمل الرائد لشفارتزشيلد أُجريتْ دراسات عدة على الثقوب السوداء. ورغم أنه لا يوجد حتى الآن دليل دامغ غير قابل للدحض على وجود الثقوب السوداء في الطبيعة، فإن هناك عددًا كبيرًا من الأدلة الظرفية التي تقترح أن هذه الثقوب تقبع في قلب العديد من البِنى الفلكية. ويُعتقد أن مجال الجاذبية الشديد المحيط بثقب أسود كتلته أكبر من كتلة الشمس بمائة مليون مرة هو المحرِّك الذي يوجه السطوع الهائل لأنواع بعينها من المجرات. وتشير الدراسات الحديثة التي أُجريتْ على حركة النجوم قرب مراكز المجرات إلى وجود تركيزات قوية للغاية من المادة عادةً ما ترتبط بثقوب سوداء ذات كتل تُقارِب هذا الرقم. وثمة اعتقاد قوي باحتمال وجود ثقب أسود في قلب كل مجرة. وقد تتكون ثقوب سوداء ذات كتل أصغر كثيرًا في نهاية حياة النجم، حين تنضب مصادر طاقته وينهار على نفسه.

ثمة اهتمام كبير في وقتنا الحاضر بموضوع الثقوب السوداء، لكنها ليست ذات أهمية محورية في تطور علم الكونيات؛ لذا لن أناقشها بمزيد من التفصيل في هذا الكتاب. وبدلًا من ذلك سأناقش في الفصل التالي الدور الذي لعبتْه نظرية أينشتاين في فهمنا لسلوك الكون ككلٍّ.




شكل ٢ -٣: انحناء المكان. في غياب أي مصدر للجاذبية، ينتقل الضوء في خطوط مستقيمة. لكن إذا وُجد جسم ضخم الكتلة بالقرب من مسار الضوء، يتسبب تشوه المكان في إحناء شعاع الضوء.

الفصل الثالث

# المبادئ الأولى

نشر أينشتاين نظرية النسبية العامة في عام ١٩١٥. وبعد ذلك على الفور تقريبًا سعى إلى استغلال هذا الإطار النظري الجديد في تفسير السلوك الواسع النطاق للكون بأسره. بَيْدَ أن قلة المعلومات المتاحة له بشأن ما كان يحاول تفسيره صعَّبَت عليه تحقيق مبتغاه. ما هو شكل الكون بالفعل؟ كانت معرفة أينشتاين بعلم الفلك هزيلة، لكنه كان بحاجة لمعرفة إجابات بعض الأسئلة الجوهرية قبل أن يواصل مسعاه. كان يعلم أن الفكر المجرد وحده لن يخبره عما ينبغي أن يكون عليه شكل الكون أو سلوكه؛ فلا بد من أن يسترشد بالمشاهدات والتخمينات.

## البساطة والتناظر

ما من شك في أن النسبية العامة توفر إطارَ عمل مفاهيميًّا أنيقًا، وهو ما حاولتُ شرحه باستخدام التجارب الفكرية والصور. لكن الحقيقة القاسية هي أنها تتضمن بعضًا من أصعب المعادلات الرياضية التي جرى تطبيقها على أحد توصيفات الطبيعة. وللحصول على فكرة عن مدى تعقيدها، من المفيد مقارنة نظرية أينشتاين بالنهج النيوتني الأقدم.

في نظرية نيوتن للحركة يوجد بالأساس معادلة رياضية واحدة تحتاج إلى حل، وهي: القوة تساوي الكتلة مضروبة في التسارع، وهي تربط القوة المبذولة على جسمٍ ما بتسارع ذلك الجسم. الأمر يبدو بسيطًا بما يكفي، لكن في الواقع العملي قد يكون وصف الجاذبية باستخدام هذا النهج أمرًا معقدًا لدرجة محيرة. السبب وراء ذلك هو أن كل جزء من المادة في الكون يبذل قوة جاذبية على كل جزء آخر. ومن الأيسر نسبيًّا تطبيق هذه الفكرة على حركة جسمين متفاعلين، كالشمس والأرض، لكن إذا بدأتَ في

إضافة المزيد من الأجسام فستصير الأمور أكثر صعوبة بكثير. في الواقع، رغم أنه يوجد حل رياضي دقيق لنظرية نيوتن فيما يخص جسمين يدور أحدهما حول الآخر، فإنه لا يوجد حل عام معروف لأي موقف أكثر تعقيدًا من هذا، حتى إن تضمن ثلاثة أجسام وحسب. وتطبيق نظرية نيوتن على منظومات تضم مجموعات ضخمة من الأجسام التي يبذل بعضها قوة جاذبية على بعضٍ؛ أمرٌ صعب للغاية ويتطلب عادةً استخدام حاسبات قوية لفهم ما يحدث. الاستثناء الوحيد هو حين تتضمن المنظومة بعض التناظر المبسِّط، كما في حالة الكرة، أو تملك عناصر موزعة بانتظام في أرجاء المكان.

إن نظرية نيوتن صعبة التطبيق في المواقف الواقعية، أما نظرية أينشتاين فهي كابوس حقيقي. بادئ ذي بدء، بدلًا من المعادلة الوحيدة الموجودة في نظرية نيوتن، يوجد ما لا يقل عن عشر معادلات في نظرية أينشتاين يجب أن يتم حلها كلها على نحو متزامن. وكل معادلة منفصلة أكثر تعقيدًا بكثير من قانون التربيع العكسي البسيط لنيوتن. وبسبب التكافؤ بين المادة والطاقة الذي تمنحه لنا المعادلة: «الكتلة مضروبة في مربع سرعة الضوء»، فجميع صور الطاقة تبذل قوة جاذبية. إن مجال الجاذبية الذي ينتجه أي جسم هو في حد ذاته نوع من الطاقة، ومِن ثَمَّ فهو أيضًا له قوة جاذبية. وهذه المعضلة الشبيهة بمعضلة «من جاء أولًا، البيضة أم الدجاجة؟» يسميها الفيزيائيون «اللاخطية»، وهي تؤدي عادةً إلى تعقيد رياضي خارج عن السيطرة حين يتعلق الأمر بحل المعادلات. هذا هو حال النسبية العامة. فالحلول الرياضية الدقيقة لمعادلات أينشتاين قليلة للغاية وتتخللها فجوات كبيرة. وحتى في حالة التناظر الخاص تطرح النظرية تحديات خطيرة أمام الرياضيين والحاسبات على حد سواء.

كان أينشتاين يعلم أن معادلاته صعبة الحل، وأنه لن يستطيع إحراز تقدم كبير ما لم يفترض أن الكون يتسم بنوع من التناظر أو الاتساق المبسِّط. ففي عام ١٩١٥ كان نزْر يسير نسبيًّا معروفًا بشأن الكيفية التي تتوزع بها محتويات الكون، وكان العديد من الفلكيين يشعرون أن مجرة درب التبانة ما هي إلا «جزيرة كونية وحيدة»، فيما رأى آخرون أنها مجرد واحدة من العديد من الأجرام المتناثرة على نحو متناسق في أرجاء الفضاء. وقد راقت الفكرة الأخيرة لأينشتاين بشكل أكبر. فمجرة درب التبانة تجميعة دميمة من الغازات والغبار والنجوم، وكل هذا سيصعُب للغاية وصفه على نحو ملائم لو أنه يمثل الكون بأسره. أما الخيار الثاني فكان أفضل من حيث إنه يسمح بوجود توصيف مقبول بدرجة ما، فيه تمثِّل مجرة درب التبانة وغيرها من المجرات الأخرى

تفاصيلَ دقيقة في توزيع متَّسق متجانس إجمالًا للمادة. أيضًا كان لدى أينشتاين أسباب فلسفية تجعله يفضل الاتساق الواسع النطاق، وهي نابعة من فكرة يطلق عليها مبدأ ماخ. فإذا كان الكون متماثلًا في مواضعه كافةً، فسيكون بمقدوره إرساء نظريته الكونية على أساس راسخ عن طريق السماح لتوزيع المادة بأن يحدد إطارًا مرجعيًّا خاصًّا من شأنه أن يساعده في التعامل مع تأثيرات الجاذبية.

وهكذا، مستعينًا بأدلة رصدية قليلة للغاية، قرر أينشتاين أن يبسِّط الكون الذي وصفه عن طريق جعْله متجانسًا (أي متماثلًا في كل مكان)، على الأقل على مقياس أكبر كثيرًا من التكتلات المرصودة (أي المجرات). كما افترض أيضًا أن الكون متوحِّد الخواص (أي يبدو بالشكل نفسه من أي اتجاه). وهذان الافتراضان المتلازمان معًا يشكلان «المبدأ الكوني».

## المبدأ الكوني

إن افتراضَيِ التجانس وتوحد الخواص مرتبطٌ كلٌّ منهما بالآخر، بَيْدَ أنهما غير متكافئَينِ. فتوحُّد الخواص لا يعني بالضرورة التجانس، إلا إذا وضعنا افتراضًا إضافيًّا يتمثل في ألَّا يكون الراصد في موضع خاص. فمن شأن المرء أن يرصد توحد الخواص في أي توزيع كروي للمادة، لكن هذا يحدث فقط حين يكون في المنتصف تمامًا. إن السجادة الدائرية المرسوم عليها أشكال هي عبارة عن سلسلة من الحلقات متحدة المركز، ستبدو متوحدة الخواص في نظر الراصد الواقف في منتصف هذه الأشكال. ويطلق على المبدأ القائل إننا لا نعيش في موضع ذي أهمية خاصة في الكون اسمُ «المبدأ الكوبرنيكي»، وهي التسمية التي توحي بالدَّيْن الذي يدين به علم الكونيات الحديث للتاريخ. وتوحُّد الخواص المرصود، بالإضافة إلى المبدأ الكوبرنيكي، يفضيان بنا إلى المبدأ الكوني. من الواضح أن مجرة درب التبانة لا تتسم بتوحد الخواص، وهو ما يعلمه كل مَن يدور بناظريه في سماء الليل. فهي تشغل شريطًا منفصلًا يمتد عبر السماء، وإذا كان الكون يتكون فقط من مجرة درب التبانة فلن يتسق مع المبدأ الكوني.

رغم ما تتسم به التسمية «المبدأ الكوني» من فخامة، فعلينا ألَّا ننخدع في أصل هذه التسمية. ففي أحيان كثيرة تُستحدث المبادئ من أجل السماح بحدوث بعض التقدم حين لا يكون لدينا بيانات يمكن الاعتماد عليها، وليس علم الكونيات باستثناء. ومن المعروف الآن أن هذا التخمين اتضحتْ صحتُه بالأساس. ففي عشرينيات القرن العشرين تأكد

تمامًا أن السُّدُم واقعة خارج مجرة درب التبانة، ويبدو أن الدراسات الرصدية الأحدث للتوزيع الواسع النطاق للمجرات وإشعاع الخلفية الميكروني الكوني (الذي سنتناوله بالنقاش في الفصل السابع) تشير إلى أن الكون يتسم بالتجانس على النطاقات الكبرى مثلما تتطلب هذه الفكرة. ولم يتوصل علماء الفيزياء الفلكية إلى تفسير منطقي مقنع للسبب الذي يجعل الكون يتسم بهذا التناظر الخاص إلا في وقت قريب للغاية. وقد أُطلق على الأصل الغامض لهذا التجانس والاتساق اسم «مشكلة الأفق»، وهي واحدة من القضايا التي تناولتْها فكرة التضخم الكوني التي سنناقشها في الفصل الثامن.

## خطأ أينشتاين الفادح

متسلحًا بالمبدأ الكوني، تمكن أينشتاين من بناء نماذج رياضية متسقة ذاتيًّا للكون. لكن على الفور واجهتْه مشكلة عويصة؛ إذ كان من التبعات التي يستحيل تجنبها لنظريته أن يكون الزمكان ديناميكيًّا بالضرورة، وذلك في أي حل لمعادلاته يتم فيه استخدام المبدأ الكوني. وهذا يعني أن من المستحيل عليه أن ينشئ نموذجًا يكون فيه الكون ساكنًا وغير متغير مع مرور الزمن. فقد حتَّمت نظريته أن يكون الكون إما آخذًا في التمدد وإما آخذًا في الانكماش، رغم أنها لم تحدِّد أي الإمكانيتين هي الواقع بالفعل. لم يكن أينشتاين يملك معرفة كبيرة بعلم الفلك؛ لذا سأل بعض الخبراء عن حركة النجوم البعيدة. لكن من المحتمل أنه وجَّه الأسئلة الخطأ؛ لأنه حصل على إجابات تفيد بأنه في المتوسط لم تكن النجوم تقترب من الشمس أو تبتعد عنها. وهذا صحيح فقط في حدود مجرتنا، لكننا نعلم الآن أن هذا ليس الحال فيما يخص المجرات الأخرى.

كان أينشتاين مقتنعًا بأن الكون يجب أن يكون ساكنًا لدرجة أنه عاد مرة أخرى إلى معادلاته لتصحيحها. وقد أدرك أن بإمكانه الاحتفاظ بشكلها الأساسي، لكن مع إضافة تعديل بسيط من شأنه أن يعادل مَيل هذه النماذج الكونية إلى التمدد أو الانكماش مع مرور الزمن. وقد أُطلق على التعديل الذي أدخله اسم «الثابت الكوني». وهذا المصطلح الجديد في النظرية يمثل تعديلًا لسلوك الجاذبية على النطاقات الكبيرة للغاية. فالثابت الكوني يسمح للمكان نفسه بأن يميل للتمدد أو الانكماش، ومن الممكن ضبطه داخل النظرية بحيث يعادل تمامًا التمدد أو الانكماش الذي لولاه لتحتم على الكون أن يتسم به.

راضيًا عن هذا الحل مؤقتًا، مضى أينشتاين إلى بناء نموذج كوني ساكن، ونشره عام ١٩١٧. بعدها بعدة سنوات، نشر هابل عام ١٩٢٩ النتائج التي أدَّتْ إلى قبول فكرة أن الكون لم يكُنْ ساكنًا على الإطلاق، بل كان آخذًا في التمدد. ومِن ثَمَّ ليس لنموذج أينشتاين الآن أية أهمية إلا من منظور الاهتمام التاريخي وحسب. فدون الحاجة إلى منع التمدد الكوني، لم يكن هناك ما يدعو أينشتاين إلى استحداث الثابت الكوني. وفي سنواته الأخيرة أشار أينشتاين إلى هذا الحدث بوصفه أفدح خطأ ارتكبه في مسيرته العلمية. وعادةً ما يُعتقد أن هذا التعليق مقصود به الثابت الكوني ذاته، لكن الخطأ الحقيقي كان فشله في التنبؤ بتمدد الكون.

رغم أنه حتى وقت قريب كان أغلب علماء الكونيات يتجاهلون الثابت الكوني في نماذجهم، فإنه لم يذهب طيَّ النسيان في حقيقة الأمر. فقد ظل موجودًا يرمقنا من طرف خفي. وفي وقتنا الحالي، كما سنرى في فصول لاحقة، عاد الثابت الكوني من جديد ليلعب دورًا محوريًّا. إلا أنني سأنحِّيه جانبًا في الجزء المتبقي من حديثي في هذا الفصل.

## نماذج فريدمان

لم يكن أينشتاين العالِم الوحيد الذي تحوَّل إلى علم الكونيات في السنوات التي أعقبت مباشرة نشر نظرية النسبية العامة في عام ١٩١٥. ومن العلماء الآخرين الذين فعلوا الشيء نفسه فيزيائي روسي مغمور يُدعى ألكسندر فريدمان. لم يكن أينشتاين هو مَن طوَّر النماذج الرياضية للكون المتمدد، بل فريدمان، وهذه النماذج تمثل أساس علم كونيات الانفجار العظيم الحديث. وتتسم إنجازاته في هذا النطاق بأنها مذهلة؛ بسبب أنه أجرى حساباته في ظروف عسيرة للغاية إبَّان حصار بتروجراد. وقد تُوفي فريدمان عام ١٩٢٥ قبل أن تحظى أعماله (التي نُشرت عام ١٩٢٢) بأي تقدير دولي. وفي وقت لاحق صفَّى ستالين المعهد الذي كان يعمل به فريدمان، ثم بعد ذلك ببعض الوقت توصل القس البلجيكي جورج لومتر إلى النتائج عينها على نحو مستقل، ومن خلال لومتر تم استكشاف هذه الأفكار والتوسع فيها في أوروبا الغربية.

أبسط نماذج فريدمان هي تلك العائلة الخاصة من حلول معادلات أينشتاين التي جرى التوصل إليها على أساس افتراض صحة المبدأ الكوني، وافتراض أنه لا وجود للثابت الكوني. يلعب المبدأ الكوني دورًا كبيرًا في هذه النماذج. ففي نظرية النسبية ليس الزمن والمكان مطلقينِ. والتوصيف الرياضي لهذين الوجهين للأحداث (أي «متى»

يقع الحدث و«أين»؟) يتضمن «زمكانًا» معقدًا رباعي الأبعاد، وهو الأمر الذي يصعب تصوره ذهنيًّا. وإجمالًا، لا تمنحنا نظرية أينشتاين سبيلًا يسيرَ الفهمِ نحو فصل الزمن عن المكان. فبمقدور الراصدين المختلفين أن يختلفوا فيما بينهم بشأن الوقت المنقضي بين حدثين، اعتمادًا على حركتهما وعلى مجالات الجاذبية التي يستشعرانها. لكن إذا صح المبدأ الكوني فسيكون هناك سبيل خاص للتفكير في الزمن يجعل كل هذا أسهل كثيرًا في الفهم. فإذا كان الكون يتمتع بالكثافة عينها في كل مكان (وهو الأمر الحتمي إذا كان الكون متجانسًا) إذن فكثافة المادة نفسها تُعَدُّ بمنزلة ساعة زمنية من نوع ما. وإذا تمدد الكون، تزداد المسافة بين الجسيمات، ومِن ثَمَّ تنخفض كثافة المادة. ومع مرور المزيد من الوقت، يزداد انخفاض كثافة المادة. وبالمثل، ترتبط الكثافة المرتفعة بالزمن المبكر. ويستطيع الراصدون في أي مكان في الكون ضبط ساعاتهم وفق الكثافة المحلية للمادة بحيث تكون كل هذه الساعات متزامنة على نحو مثالي، وبذا يمكن تحقيق تزامن مثالي. ويطلق على المقياس الزمني الناتج عادةً اسم «الزمن الكوني الحقيقي».

ولأن الكثافة واحدة في كل مكان بالكون، ولأن كثافة المادة و/أو الطاقة هي التي تحدد انحناء الفضاء من خلال معادلات أينشتاين؛ فإن المبدأ الكوني يبسط كذلك الطريقة التي يمكن أن ينحني بها المكان استجابةً للجاذبية. فالمكان يمكن أن يكون منحنيًا، بَيْدَ أنه يجب أن يكون منحنيًا بالصورة نفسها في كل نقطة من نقاطه. وفي واقع الأمر هناك ثلاث طرق فقط يمكن أن يحدث بها هذا.

الطريقة البديهية للحصول على الانحناء ذاته في كل النقاط هي ألا يكون هناك أي انحناء في كل النقاط، وهذا يطلق عليه «الكون المنبسط». في الكون المنبسط ينتقل الضوء في خطوط مستقيمة، وتنطبق كل قوانين الهندسة الإقليدية مثلما يحدث في العالم «الطبيعي». لكن إذا لم يكُن المكان منحنيًا؛ فما الذي حدث للجاذبية؟ فهناك مادة في الكون المنبسط، لماذا إذن لا تتسبب في تقوُّس المكان؟ الإجابة هي أن كتلة الكون تسبب تقوس المكان بالفعل، لكن هذا تتم معادلته على نحو تام بواسطة الطاقة المُحتواة داخل عملية تمدد الكون؛ فالمادة والطاقة تتآمران من أجل إلغاء تأثيرات جاذبية كلٍّ منهما على الأخرى. وعلى أية حال، حتى إذا كان المكان منبسطًا، فالزمكان لا يزال منحنيًا.

من الواضح أن الكون المنبسط يمثل حالة خاصة؛ لأنه يقتضي وجود توازن دقيق بين التمدد من ناحية وبين قوة الجاذبية من ناحية مقابلة. وحين لا يوجد هذا التوازن، يوجد لدينا احتمالان. فإذا كان الكون يتمتع بكثافة مادة أعلى، فسيكون تأثير الجاذبية

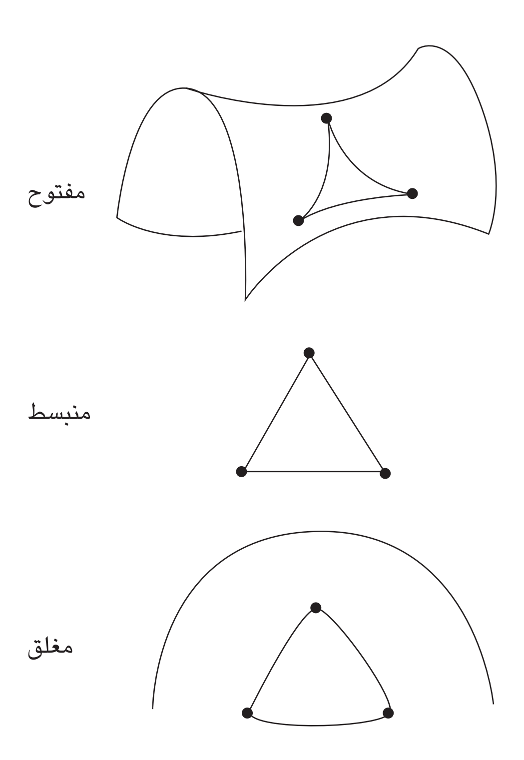
الخاص بالمادة الموجودة فيه هو الرابح، وسيجذب الكون على نفسه على نحو أشبه بسطح ثلاثي الأبعاد لكرةٍ ما. رياضيًّا، يكون انحناء الفضاء موجبًا في مثل هذا الموقف. وفي هذه الحالة، حالة «الكون المغلق»، تتجمع أشعة الضوء وتتقاطع بعضها مع بعض. ورغم أن الكون المنبسط يمكن أن يمتد بصورة لا نهائية في كل الاتجاهات، فإن الكون المغلق محدود. فإذا انطلقتَ في اتجاهٍ ما فسينتهي بك الحال بالعودة إلى نفس النقطة التي انطلقتَ منها. البديل الثاني هو «الكون المفتوح». وهذا الكون أيضًا محدود، بَيْدَ أنَّ تصوُّره ذهنيًّا أصعب من الكون المغلق؛ لأن انحناء المكان هنا يكون سالبًا. وأشعة الضوء في هذا المثال تتشتت متفرقة، كما هو موضح في المثال ثنائي الأبعاد الموضح في الشكل (٣-١).

إن سلوك المكان في هذه النماذج يعكس الطريقة التي تتطور بها مع الوقت. فالكون المغلق كون محدود، كما أن له عُمرًا محدودًا. فإذا كان الكونُ يتمدد في أي وقت وهو كون مغلق، فستبطئ وتيرة التمدد في المستقبل، وفي النهاية سيتوقف الكون عن التمدد وينهار على نفسه. أمَّا نموذجَا الكون المنبسط والكون المفتوح فسيتمددان إلى الأبد. فالجاذبية تقاوم تمدد الكون على الدوام في نماذج فريدمان، بَيْدَ أنها لا تربح معركتها إلا في حالة الكون المغلق.

تُعَدُّ نماذج فريدمان الأساسَ الذي يقوم عليه جزء كبير من نظرية الانفجار العظيم الحديثة، لكنها أيضًا تحتوي على مفتاح أكبر نقاط ضعفها. فإذا استخدمنا هذه الحسابات من أجل عكس تمدد الكون وأرجعنا عقارب الساعة إلى الوراء انطلاقًا من حالة الكون الحالية، فسنجد أن الكون يصير أكثر كثافة كلما عدنا بالزمن إلى الوراء. وإذا حاولنا العودة أكثر وأكثر فستتداعى الحسابات الرياضية عند «نقطة تفرد».

## الطبيعة المتفردة للجاذبية

في الرياضيات، نقطة التفرد هي خاصية متطرفة تصير فيها القيمة العددية لكمية محددة قيمة لا نهائية خلال مسار عملية الحساب. كمثال مبسط، تَدَبَّرْ حساب القوة النيوتنية الناشئة بسبب الجاذبية التي يمارسها جسم ضخم على جسيم آخر. هذه القوة تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة بين الجسمين، بحيث إذا حاولنا حساب القوة بين جسمين تبلغ المسافة التي تفصل بينهما صفرًا، فستكون النتيجة لا نهائية. ليست نقاط التفرد دومًا علامة على وجود مشكلات رياضية خطيرة؛ فأحيانًا تحدث بسبب اختيار




شكل ٣-١: المكان المفتوح، والمنبسط والمغلق، في بُعدين. في المكان المنبسط ثنائي الأبعاد (في المنتصف) تسري قوانين الهندسة الإقليدية. وفي هذه الحالة يكون مجموع الزوايا الداخلية للمثلث ١٨٠ درجة. وفي المكان المغلق على نحو أشبه بالكرة (بالأسفل)، يكون مجموع الزوايا الداخلية للمثلث أكبر من ١٨٠ درجة، بينما في المكان المفتوح (على غرار الشكل المبيَّن هنا الشبيه بالسرج) يكون المجموع أقل من ١٨٠ درجة.

خاطئ للإحداثيات. على سبيل المثال، يحدث أمر عجيب مشابِه لنقطة التفرد في الخرائط التقليدية الموجودة في الأطلس. فهذه الخرائط تبدو معقولة تمامًا إلى أن تبدأ في النظر بالقرب من القطبين. ففي الإسقاط الاستوائي التقليدي، لا يظهر القطب الشمالي كنقطة كما ينبغي أن يكون، بل تمتد النقطة كخط مستقيم على امتداد الجزء العلوي من الخريطة. لكن إذا سافرتَ إلى القطب الشمالي فلن ترى بالتأكيد أي شيء كارثي هناك.

فنقطة التفرد التي تسبب هذه النقطة الظاهرة على الخريطة تبدو كمثال على نقاط التفرد الإحداثية، ومن الممكن تغيير شكلها باستخدام نوع مختلف من الإسقاط. ولن يحدث شيء عجيب لك إذا حاولتَ عبور مثل هذا النوع من نقاط التفرد.

توجد نقاط التفرد بكثرة مُحبِطة في حلول معادلات النسبية العامة. وبعض هذه النقاط تكون نقاطَ تفرد إحداثية شبيهة بتلك التي ناقشتُها توًّا. وهذه لا تمثل أية خطورة. لكن مكمن تميز نظرية أينشتاين هو أنها تتنبأ بوجود نقاط تفرد حقيقية تصير فيها القيم المادية الحقيقية، على غرار كثافة المادة أو درجة حرارتها، لا نهائية. ومن الممكن أن يكون انحناء الزمكان أيضًا لا نهائيًّا في مواقف معينة. فوجود نقاط التفرد هذه يوحي للكثيرين بأن بعض الآليات الفيزيائية التي تصف تأثير جاذبية المادة عند الكثافات المتطرفة بعيد عن أفهامنا. ومن الممكن لنظريةٍ للجاذبية الكمية أن تمكِّن الفيزيائيين من حساب ما يحدث في أعماق الثقوب السوداء دون الحاجة لأن تصير كل القيم الرياضية لا نهائية. وفي الواقع، كَتَبَ أينشتاين نفسُه في عام ١٩٥٠ عن هذا الأمر قائلًا:

> إن النظرية مبنية على الفصل بين مفهومَيْ مجال الجاذبية والمادة. ورغم أن هذا يُعَدُّ تقريبًا صحيحًا في مجالات الجاذبية الضعيفة، فإنه قد يكون غير ملائم عند الكثافات العالية للغاية للمادة. ومِن ثَمَّ لا يمكننا افتراض صحة المعادلات عند الكثافات العالية للغاية للمادة، ومن الممكن لنظريةٍ موحدة ألَّا تحتوي على مثل نقاط التفرد هذه.

لعل أشهر الأمثلة على نقاط التفرد هي تلك القابعة في قلوب الثقوب السوداء. يظهر لنا هذا في حل شفارتزشيلد الخاص بالثقب الأسود ذي التناظر الكروي المثالي. لسنوات عديدة ظن الفيزيائيون أن وجود نقطة تفرُّد كهذه ناتجٌ فقط عن الطبيعة المصطنعة نسبيًّا لهذا الحل الكروي، لكن في سلسلة من الأبحاث الرياضية، بيَّن روجر بنروز وآخرون أنه ليس من الضروري وجود تناظر خاص كي تنشأ نقاط التفرد هذه كلما انهار جرم ما تحت وطأة جاذبيته.

إن النسبية العامة تبذل قصارى جهدها كي تُخفِيَ نقاط التفرد عنا، كما لو أنها تعتذر عن التنبؤ بها في المقام الأول. فثقب شفارتزشيلد الأسود يكون محاطًا بأفق حدث يحمي الراصدين الخارجيين فعليًّا من نقطة التفرد نفسها. ويبدو من المرجح أن

كل نقاط التفرد في النسبية العامة محمية بهذه الطريقة، أما «نقاط التفرد المكشوفة» فيُعتقد أنه ليس لها وجود مادي حقيقي.

في ستينيات القرن العشرين لفتتْ أبحاث روجر بنروز عن الخصائص الرياضية للثقوب السوداء انتباهَ ستيفن هوكينج، الذي واتتْه فكرة محاولة تطبيقها في موضع آخر. كان بنروز قد تدبر ما سوف يحدث في المستقبل حين ينهار جسمٌ ما تحت وطأة جاذبيته، لكن هوكينج كان مهتمًّا بمعرفةِ هل من الممكن تطبيق هذه الأفكار على مشكلة فهمنا لِمَا حدث في الماضي لمنظومة نعرف الآن أنها آخذة في التمدد؛ أي الكون! تواصل هوكينج مع بنروز بشأن هذا الأمر وعَمِلا معًا على مشكلة التفرد الكوني، كما باتت تُعرف الآن. وقد بيَّنَا معًا أن نماذج الكون المتمدد تتنبأ بوجود نقطة تفرُّد في بداية الكون، كانت فيها درجة الحرارة والكثافة لا نهائيتين. وسواء أكان الكون مفتوحًا أم مغلقًا أم منبسطًا، ثمة حدٌّ أساسي لفهمنا. ففي البدء كانت اللانهائية.

أغلب علماء الكونيات يفسرون نقطة تفرد الانفجار العظيم بالطريقة عينها التي يفسرون بها نقطة تفرد الثقب الأسود التي ناقشناها سابقًا؛ بمعنى أن معادلات أينشتاين تنهار عند نقطةٍ ما في الكون المبكر؛ بسبب الظروف الفيزيائية المتطرفة التي كانت موجودة وقتها. وإذا صح هذا الافتراض فإن أملنا الوحيد لفهم المراحل المبكرة من تمدد الكون سيكون التوصل إلى نظرية أفضل. ولأننا لا نملك مثل هذه النظرية إلى الآن، تظل نظرية الانفجار العظيم غير كاملة. وتحديدًا، ما دمنا بحاجة لأن نعرف ميزانية الطاقة الإجمالية للكون كي نعرف أكان كونًا مفتوحًا أم مغلقًا، فلن نستطيع من خلال النظريات وحدها تحديد أيٍّ من هذين البديلين هو التوصيف «الصحيح». وهذه المَثْلبة هي السبب الذي يجعل من الملائم لنا أن نقول «نموذج» الانفجار العظيم، لا «نظرية» الانفجار العظيم. فمشكلة عدم معرفتنا بشأن الظروف الأولية للكون هي السبب الذي جعل علماء الكونيات عاجزين إلى الآن عن الإجابة عن بعض الأسئلة الأساسية؛ مثل مسألة هل كونُنا سيتمدد إلى الأبد أم لا.

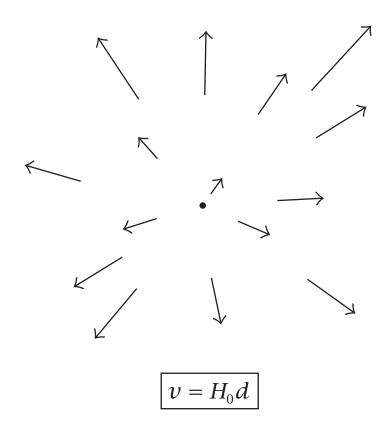
الفصل الرابع

# الكون المتمدد

ركَّزتُ إلى الآن على الطريقة التي أدَّتْ بها التطورات في الفيزياء النظرية — وخاصة النسبية العامة — إلى تطورات كبيرة في النظرية الكونية في عشرينيات القرن العشرين. بَيْدَ أن هذه الأفكار الجديدة لم تحظَ بالقبول إلا حين مكَّنَت المشاهداتُ المُحسَّنة علماءَ الفلك من أن يبدءوا في وضع تقديرات يُعتمَد عليها بشأن حركة المجرات والمسافات التي تفصلنا عنها. وفي هذا الفصل سأناقش هذه المشاهدات، والكيفية التي توافقتْ بها مع إطار العمل النظري.

## قانون هابل

تتلخص طبيعة تمدد الكون في معادلة واحدة بسيطة، تُعرف باسم «قانون هابل». وينص هذا القانون على أن السرعة الظاهرية $v$ لأي مجرة آخذة في الابتعاد عن الراصد تتناسب طرديًّا مع المسافة التي تفصل بينهما، ورمزها $d$. وفي وقتنا الحالي يعرف ثابت التناسب باسم «ثابت هابل» ويُرمز إليه بالرمز $H$ أو $H_0$. ومِن ثَمَّ فإن قانون هابل يُكتب على النحو التالي: $v = H_0 d$. والعلاقة بين السرعة $v$ وبين المسافة $d$ تسمَّى علاقة خطية؛ لأنك إذا وضعت القِيَم المَقِيسة للسرعات والمسافات لعينة من المجرات على مخطط بياني (كما فعل هابل)، فستجد أنها تقع على خط مستقيم. ومقدار انحدار هذا الخط هو $H_0$. إن قانون هابل يعني بالأساس أنه إذا كان هناك مجرتان تبعد إحداهما عن الراصد ضعف المسافة التي تبعد بها الأخرى عنه، فستتحرك المجرة البعيدة بسرعة ضعف سرعة المجرة القريبة، وإذا وقعَتْ على مسافة ثلاثة أضعاف المسافة فستتحرك بثلاثة أضعاف السرعة، وهكذا دواليك.

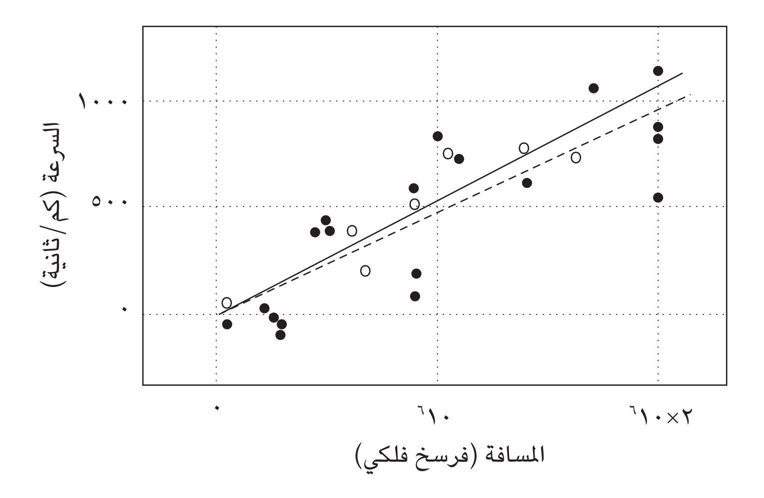


$v = H_0 d$

شكل ٤-١: قانون هابل. عند الرصد من نقطة مركزية، ينص قانون هابل على أن سرعة التراجع الظاهرية للمجرات البعيدة تتناسب طرديًّا مع المسافة بينها وبين الراصد؛ ومِن ثَمَّ كلما كانت المجرة أبعد في المسافة، كان تراجعها أسرع. ليس لهذا التمدد مركز محدد، فأي نقطة يمكن معاملتها على أنها نقطة الأصل.

نشر هابل الاكتشاف الخاص بذلك القانون الشهير عام ١٩٢٩، الذي نتج عن دراسة خطوط الطيف الخاصة بعينة من المجرات. ويستحق الفلكي الأمريكي فيستو سليفر أيضًا أن يُنسب إليه جزء كبير من الفضل في هذا الاكتشاف. فمنذ وقت مبكر يرجع إلى عام ١٩١٤ حصل سليفر على خطوط الطيف الخاصة بمجموعة من السُّدُم (وهو الاسم الذي كان يطلق وقتها على المجرات) التي أظهرت أيضًا هذه العلاقة، رغم أن تقديرات المسافة الخاصة بها كانت تقريبية. لكن لسوء الحظ فإن النتائج المبكرة التي توصَّل إليها سليفر، وعرضها في الاجتماع السابع عشر للجمعية الفلكية الأمريكية في عام ١٩١٤، لم تُنشر قط، ولم يُقدِّر التاريخُ الإسهامَ الذي قدَّمه سليفر حقَّ التقدير قطُّ.

كيف إذن توصل هابل إلى قانونه؟ يسمى الأسلوب الذي استخدمه هابل باسم «التحليل الطيفي». فالضوء القادم من أي مجرة بعيدة يحتوي على مزيج من الألوان، أنتجتْها كل النجوم الموجودة داخل هذه المجرة. ويقوم منظار التحليل الطيفي، أو المطياف، بفصل الضوء إلى الدرجات اللونية المكوِّنة له بحيث يمكن تحليل مزيج الألوان




شكل ٤ -٢: مخطط هابل. هذا هو مخطط هابل البياني الأصلي للعلاقة بين السرعة والمسافة المنشور عام ١٩٢٩. لاحظ أن بعض المجرات القريبة تقترب في الواقع من مجرتنا، وهناك قدر معتبر من التشتت في المخطط.

الخاص به على نحو منفصل. ومن السبل البسيطة للوصول إلى هذه النتيجة استخدام الموشور؛ فباستخدام الموشور يمكن فصل الضوء الأبيض العادي إلى طيف يمثِّل ألوان قوس قُزح. لكن بالإضافة إلى امتلاكها ألوانًا مختلفة، تحتوي الأطياف الفلكية أيضًا على سمات محددة تسمى خطوط الانبعاث. وهذه الخطوط تُنتَج في الغاز الذي يحتويه أي جِرم بواسطة تنقُّل الإلكترونات بين مستويات الطاقة المختلفة. وهذه التنقلات تحدث عند أطوال موجية محددة اعتمادًا على التركيب الكيميائي للمصدر، وهذه الأطوال الموجية يمكن قياسها بدقة في التجارب المُجرَاة في المختبرات. تمكَّن قانون هابل من تحديد خطوط الانبعاث في العديد من المجرات. لكن عند مقارنة موضعها في الطيف المَقيس بالموضع الذي ينبغي أن تكون الخطوط موجودة فيه، وُجِد أنها عادة ما تكون في المكان الخطأ. في الواقع، كانت الخطوط في كل الأحيان تقريبًا مُزاحة ناحية الطرف الأحمر للطيف، نحو الأطوال الموجية الأطول. وقد فسر هابل هذا بأنه ناتج عن إزاحة دوبلر.

## إزاحة دوبلر

أحدثَ تقديم تأثير دوبلر إلى عالَم الفيزياء جَلَبة شديدة في أربعينيات القرن التاسع عشر. في الواقع حدثت هذه الجلبة حرفيًّا؛ لأن أُولى التجارب التي أُجريتْ لبيان هذا التأثير تضمنت عددًا من عازفي البوق يتحرك بهم قطار بخاري. كان تطبيق المبدأ في ذلك الوقت على خصائص موجات الصوت حين تكون هناك حركة نسبية بين مصدر الصوت وبين المتلقي. كلنا يألف هذا التأثير من واقع خبرات حياتنا اليومية؛ فبوق سيارة الشرطة الآخذة في الاقتراب له طبقة صوت أعلى من ذلك الخاص بالسيارة الآخذة في الابتعاد. وأسهل طريقة لفهم هذا التأثير هي تذكُّر أن طبقة الصوت تعتمد على الطول الموجي الخاص بالموجات التي تتألف منها. وطبقة الصوت العالية، أو الحادة، تعني أن الموجات الصوتية قصيرة. فإذا كان مصدر الصوت يتحرك بسرعة تُقارِب سرعة الصوت، فسيميل إلى أن يلحق بالموجات التي يطلقها من الأمام؛ مِن ثَمَّ يقلل الطول الموجي الظاهري لها. وبالمثل، يميل مصدر الصوت إلى الابتعاد عن الموجات التي يطلقها من الخلف، مُزيدًا الفجوة بين الموجات ومِن ثَمَّ يقلل طبقة الصوت الظاهرية الخاصة بها.

في سياق الفلك، ينطبق تأثير دوبلر على الضوء. في المعتاد يكون التأثير طفيفًا للغاية، لكنه يصير قابلًا للإدراك إذا كانت سرعة المصدر تقترب بدرجة كبيرة من سرعة الضوء. (يكون تأثير دوبلر في حالة الصوت طفيفًا ما لم تكن سرعة السيارة كبيرة بدرجةٍ ما، ويكون المقياس ذو الصلة في هذه الحالة هو سرعة الصوت.) ومِن ثَمَّ فإن مصدر الضوء المتحرك يميل إلى أن ينتج الضوء بأطوال موجية أقصر إذا كان آخذًا في الاقتراب من الراصد، وبأطوال موجية أطول إذا كان آخذًا في الابتعاد، وفي هاتين الحالتين يُزاح الضوء إما نحو الجزء الأزرق أو الجزء الأحمر من الطيف، على الترتيب. بعبارة أخرى، توجد إزاحة زرقاء (في حالة مصدر الضوء الآخذ في الاقتراب) أو إزاحة حمراء (في حالة مصدر الضوء الآخذ في الابتعاد).

لكن إذا كان المصدر يبعث ضوءًا أبيض، فلن يصير المرء قادرًا على رؤية أية إزاحة من أي نوع. فإذا فرضنا أن كل خط انزاح انزياحًا أحمر في طوله الموجي بالمقدار (س)، فعندئذٍ سيُرى الضوء المنبعث بالطول الموجي (ص) على أن له طولًا موجيًّا مقداره (ص + س). لكن المقدار عينه من الضوء سيظل يُرى بالطول الموجي الأصلي (س)؛ وذلك لأن الضوء الذي انبعث بالأساس بالطول الموجي (ص – س) سيُزاح إلى هذا الموضع كي يملأ الفجوة. ومِن ثَمَّ سيظل الضوء الأبيض يُرى بوصفه ضوءًا أبيض، بِغَضِّ النظر

عن إزاحة دوبلر. ولرؤية هذا التأثير، على المرء أن ينظر إلى خطوط الانبعاث، التي توجد عند ترددات منفصلة بحيث لا يمكن أن يحدث مثل هذا التعويض. فالمجموعة الكاملة من الخطوط ستُزاح نحو هذا الاتجاه أو ذاك في الطيف، لكن الخطوط المنفردة ستحافظ على المسافات النسبية بينها؛ ومِن ثَمَّ يكون من اليسير تحديد مقدار انزياحها نسبةً إلى مصدر الضوء الساكن في المختبر.

قاس هابل انزياحًا أحمر كبيرًا في حالة المجرات الأبعد في عينة المجرات التي عمل عليها مقارنة بالمجرات القريبة. وقد افترض أن ما يراه هو تأثير دوبلر؛ لذا حوَّل انزياح خطوط الطيف إلى مقياس للسرعة. وحين وضع «سرعة التراجع الظاهرية» هذه في مخطط بياني في مقابل المسافة، حصل على علاقته الخطية الشهيرة. ورغم أن قانون هابل يُنظر له الآن بوصفه يمثِّل تمدد الكون، فإن هابل نفسه لم يخرج بهذا التفسير من النتائج. فقد كان لومتر هو أول منظِّر على الأرجح يفسر قانون هابل بحيث يعني تمدد الكون بأسره. إن ورقة لومتر البحثية التي نشرها عام ١٩٢٧، واستبَقَ فيها ورقة هابل الكلاسيكية المنشورة عام ١٩٢٩، لم تخلِّف سوى القليل من الاهتمام؛ لأنها كانت مكتوبة بالفرنسية ومنشورة في دورية بلجيكية مغمورة. ولم تُنشر ورقة لومتر «بالإنجليزية» إلا عام ١٩٣١ بفضل الفلكي البريطاني آرثر ستانلي إدنجتون، وذلك في دورية «التقارير الشهرية للجمعية الفلكية الملكية» الأكثر تأثيرًا. ويُعَدُّ ارتباط قانون هابل بالتمدد الكوني أحد الأعمدة الداعمة الأساسية لنظرية الانفجار العظيم؛ لذا يستحق لومتر هو الآخر أن يُنسَب إليه الفضل العظيم لقيامه بهذه الخطوة المهمة.

## تفسير قانون هابل

إن حقيقة أن المجرات المرصودة آخذة في التحرك مبتعدة عنا توحي بأننا لا بد أن نكون في مركز التمدد. فهل يُخرق هذا المبدأ الكوبرنيكي ويضعنا في موضع خاص من الكون؟ الإجابة هي: لا. فأي راصد آخر سيرى أيضًا أن كل شيء يتحرك مبتعدًا عنه. وفي الواقع، من منظور عملية التمدد، كل النقاط في الكون متكافئة. علاوة على ذلك، من الممكن أن يُثبَت رياضيًّا أن قانون هابل «يجب» أن ينطبق في كونٍ متمدد متجانس متوحِّد الخواص؛ أيْ كون يصح فيه المبدأ الكوني. فهذا هو السبيل الوحيد كي يتمدد مثل هذا الكون.

قد يفيد أن نتصور الموقف عن طريق اختزال الأبعاد الثلاثة للمكان إلى سطح بالُون ثنائي الأبعاد (في هذه الحالة سيكون الكون مغلقًا، لكن الهندسة لا تهمنا تحديدًا في هذا المثال التوضيحي). إذا رسمتَ نقاطًا على سطح البالون ثم نفخته، فمن منظور كل نقطة سيبدو أن كل النقاط الأخرى تبتعد عنها كما لو أن هذه النقطة بعينها هي مركز التمدد. لكن ثمة مشكلة تعتري هذا التشبيه، وهي أن المرء يكون واعيًا إلى أن السطح الثنائي الأبعاد منطمر داخل الأبعاد الثلاثة لمكاننا المألوف. ومِن ثَمَّ يرى المرء أن المركز الحقيقي للتمدد هو مركز المكان الواقع داخل البالون، وهذا غير دقيق. علينا التفكير في البالون بوصفه الكونَ كله. فهو ليس منطمرًا داخل مكان آخر، ولا وجود لذلك المركز الكوني. فكل نقطة على سطح البالون هي المركز. وهذه الصعوبة عادة ما تختلط أيضًا في ذهن المرء بالسؤال الخاص بالموضع الذي حدث فيه الانفجار العظيم: ألسنا نتحرك مبتعدين عن موضع الانفجار الأصلي؟ أين كان مكان هذا الانفجار؟ والإجابة هي أن الانفجار حدث في كل مكان، وكلُّ شيء يتحرك مبتعدًا عنه. لكن في البداية، في نقطة التفرد الخاصة بالانفجار العظيم، كل مكان وكل شيء كان في الموضع ذاته.

بعد أكثر من سبعين عامًا على أعمال لومتر، لا تزال بعض الصعوبات تكتنف تفسير قانون هابل. فهابل لم يقِس السرعات، بل الإزاحات الحمراء. والإزاحة الحمراء، التي عادةً ما يُرمز إليها بالرمز $z$ في علم الكونيات، تقيس التغير الكسري في الطول الموجي لخط مرصود نسبةً إلى موضعه المتوقع. وفي بعض الأحيان يُقدَّم قانون هابل بوصفه علاقة خطية بين الإزاحة الحمراء $z$ والمسافة $d$، بدلًا من علاقة بين سرعة التراجع $v$ والمسافة $d$. وإذا كانت السرعات محل الدراسة أصغر كثيرًا من سرعة الضوء، فلا توجد مشكلة؛ لأنه في هذه الحالة تكون الإزاحة الحمراء مساوية تقريبًا لسرعة مصادر الضوء المعبَّر عنها في صورة كسر بسيط من سرعة الضوء؛ ومن ثم إذا كانت هناك علاقة تناسب طردي بين الإزاحة الحمراء والمسافة، وبين الإزاحة الحمراء والسرعة، تكون هناك بالمثل علاقة تناسب طردي بين السرعة والمسافة. ما هي، إذن، الصيغة الصحيحة التي علينا استخدامها؟ في نماذج فريدمان يكون تأويل قانون هابل بسيطًا لدرجة مذهلة. فالعلاقة الخطية بين سرعة التراجع والمسافة تكون «دقيقة»، حتى حين تكون السرعات كبيرة على نحو اعتباطي.

قد يُقلِق هذا بعضَكم؛ لأنكم بالتأكيد سمعتم أن من المستحيل لأي جسم أن يتحرك بسرعة تزيد على سرعة الضوء. ففي كون فريدمان، كلما كان الجِرم أبعد؛ كانت سرعته

التي يبتعد بها عن الراصد أكبر. ومن الممكن أن تزيد سرعة الجِرم عن سرعة الضوء بأي مقدار يروق لك. لكن هذا لا يخالف أي مبدأ للنسبية؛ لأن الراصد لا يمكنه رؤية هذا الجِرم؛ فهو مُنزاح انزياحًا أحمر بدرجة لا نهائية.

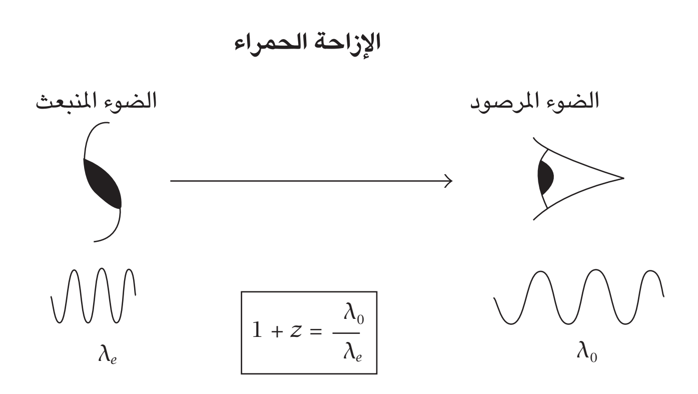
أيضًا هناك مشكلة كامنة فيما نعنيه بمصطلح «المسافة»، وكيفية قياسها. في المعتاد لا يستطيع الفلكيون قياس المسافة الفاصلة بيننا وبين أحد الأجرام قياسًا مباشرًا. فليس بوسعهم أن يمدوا مسطرة نحو مجرة بعيدة، ولا يستطيعون عادةً استخدام أسلوب التثليث كما يفعل المسَّاحون؛ لأن المسافات المَعْنِية تكون كبيرة للغاية. بدلًا من ذلك عليهم إجراء قياساتهم باستخدام الضوء المنبعث من الجِرم محل الدراسة. وبما أن الضوء ينتقل بسرعة محددة، وبما أن الكون يتمدد — كما بِتْنا نعرف بفضل هابل — فالأجرام الآن ليست في نفس المواضع التي كانت فيها عندما انبعث الضوء منها. ومن ثم فالفلكيون مجبَرون على استخدام قياسات غير مباشرة للمسافة، وعلى محاولة تصحيح ما تسبب فيه تمدد الكون من تغيير من أجل تحديد الموضع الذي يكون الجرم فيه بالضبط.

لكن في الواقع يفيدنا التفكير النظري هنا أيضًا. فالتفكير بشأن السرعات والمسافات الخاصة بمصادر الضوء لا يلزم أن يكون معقدًا بالضرورة. وبينما يُنظر عادةً إلى الإزاحة الحمراء بوصفها إزاحة دوبلر، فثمة وسيلة أخرى لتصور هذا التأثير، وهي أبسط كثيرًا، وفي الواقع أدق كثيرًا كذلك. ففي الكون المتمدد، يزيد الانفصال بين أية نقاط بالوتيرة عينها في جميع الاتجاهات. تخيَّل ورقة رسم بياني آخذة في التمدد. ستبدو الشبكة العادية على الورقة في وقت ما بعينه وكأنها نسخة منتفخة مما كانت عليه في وقت سابق. ولأن تناظُرَ الموقف محفوظ، فإننا نحتاج فقط لأن نعرف المُعامِل الذي تمددت به الشبكة؛ كي نستعيد الشبكة الماضية من اللاحقة. وبالمثل، بما أن الكون المتجانس متوحد الخواص يظل على الحال عينه أثناء تمدده، فإننا نحتاج فقط إلى معرفة «معامل قياس» إجمالي للحصول على صورة للظروف الفيزيائية الماضية من البيانات الحالية. وهذا المعامل عادةً ما يُرمز إليه بالرمز $a(t)$ ويتحدد سلوكه من خلال معادلات فريدمان التي ناقشناها في الفصل السابق.

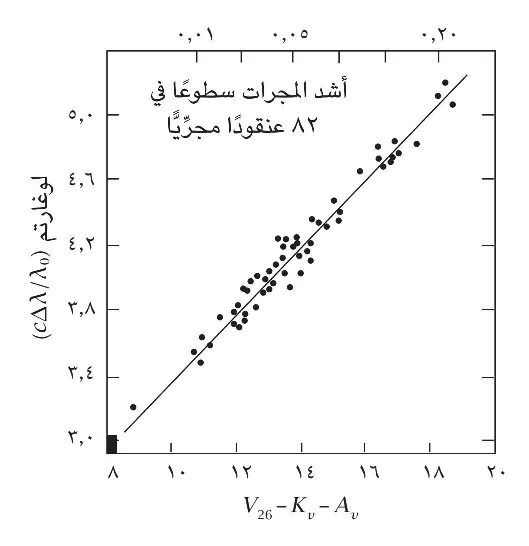
كما تذكُر فإن الضوء ينتقل بسرعة محددة. فالضوء الذي يصلنا الآن من مصدر بعيد لا بد أنه انبعث من هذا المصدر منذ وقت محدد في الماضي. وفي وقت انبعاث الضوء كان الكون أصغر عمرًا مما هو عليه الآن، وبما أن الكون آخِذ في التمدد فلا بد أنه كان

أصغر حجمًا أيضًا. وإذا كان الكون قد تمدد بمُعاملٍ ما بين انبعاث الضوء ورصده بواسطة التليسكوب، فستستطيل موجات الضوء المنبعثة بالمُعامل عينه مع انتقالها عبر الفضاء. على سبيل المثال، إذا تمدد الكون بمُعامل قدره ثلاثة فسيتضاعف الطول الموجي ثلاثة أضعاف. هذا يعني زيادة قدرها ٢٠٠ بالمائة، ومن ثم يُرصَد المصدر على أن له إزاحة حمراء مقدارها ٢. وإذا كان مُعامل التمدد يبلغ ١٠ بالمائة وحسب (أي معامل قدره ١,١) فسيكون مقدار الإزاحة الحمراء ٠,١، وهكذا دواليك. فالإزاحة الحمراء تحدث نتيجة تمدد الزمكان الذي سببه التمدد الكوني.

هذا التفسير على سهولته راوغ الفيزيائيين لسنوات عدة. ففي عام ١٩١٧ نشر فيليم دي سيتَر نموذجًا كونيًّا توصل فيه إلى أن أشعة الضوء ستُزاح انزياحًا أحمر. ولأنه استخدم إحداثيات غريبة كي يعبر فيها عن نتائجه فإنه لم يدرك أن نموذجه كان يمثِّل كونًا متمددًا، وبدلًا من ذلك سعى إلى تفسير ما توصل إليه بوصفه نوعًا من تأثيرات الجاذبية العجيبة. ولسنوات عدة كان هناك قدر كبير من الحَيرة بشأن طبيعة «تأثير دي سيتر»، لكن من المعروف الآن أنه بسيط للغاية.




شكل ٤ -٣: الإزاحة الحمراء. بينما ينتقل الضوء من مجرة إلى الراصد فإنه يستطيل بفعل تمدُّد الكون، وفي نهاية المطاف يصل الضوء إلى الراصد بطول موجي أطول من ذلك الذي انبعث به.




شكل ٤-٤: تحديث لمخطط هابل. تجميعة أحدث للسرعات والمسافات مبنية على أعمال آلان سانديج. نطاق المسافات المغطَّى بالشكل أكبر بكثير من ذلك الوارد في المخطط الأصلي لهابل. المستطيل الأسود الصغير في الركن الأسفل للمخطط من شأنه أن يغطي كل البيانات التي أوردها هابل في مخططه عام ١٩٢٩.

من المهم أيضًا أن نؤكد أنه ليس كل شيء يشارك في عملية التمدد؛ فالأجسام التي تحتفظ بتماسكها بفعل قوًى أخرى خلاف الجاذبية لا تتمدد، وهذا يشمل الجسيمات الأولية والذرات والجزيئات والصخور. فهذه الأجسام تظل في حجم مادي ثابت بينما الكون يتمدد حولها. وبالمثل، الأجسام التي تهيمن داخلها قوة الجاذبية تقاوم التمدد هي الأخرى. فالكواكب والنجوم والمجرات مترابطة معًا بقوة شديدة بواسطة قوى الجاذبية، وذلك يمنعها من أن تتمدد مع بقية الكون. بل وعلى مقياس حجم أكبر من المجرات، لا تتحرك جميع الأجرام بعيدًا بعضها عن بعض هي الأخرى. على سبيل المثال، مجرة أندروميدا M31 في واقع الأمر آخذة في الاقتراب من مجرة درب التبانة؛ لأن هاتين المجرتين مترابطتان معًا بفعل قوة الجذب المتبادلة بينهما. وبعض العناقيد المجرِّية الضخمة يتماسك بعضها مع بعضٍ في مواجهة هذا التمدد الكوني. قد لا تكون الأجرام

الأكبر من هذا مترابطة بالضرورة (كما هو الحال بالنسبة إلى المجرات الفردية)، لكن جاذبيتها قد تكون من القوة بحيث تُحدث قدرًا من التشوُّه في قانون هابل. فرغم أن خطية قانون هابل راسخة الآن بدرجة كبيرة، وصولًا إلى مسافات كبيرة للغاية، فهناك قدر من «التشتت» حول هذا الخط المستقيم. جزء من هذا يرجع إلى الأخطاء الإحصائية وعدم اليقين بشأن قياسات المسافات، لكن ليست هذه القصةَ كلَّها. فقانون هابل لا يصح بدرجة مثالية إلا بالنسبة إلى الأجرام التي تتحرك داخل كون متجانس ومتوحد الخواص على نحو مثالي. وكوننا قد يكون على هذا النحو تقريبًا على النطاقات الكبيرة للغاية، لكنه ليس متجانسًا تمامًا. وطبيعته المفتقدة للتجانس في بعض المواضع تجعل المجرات تحيد عن «تدفق هابل» وهو ما يسبب التشتت في مخطط هابل.

لكن على أكبر النطاقات قاطبة، لا توجد قوًى قوية بما يكفي بحيث تقاوم الميل العام للكون إلى التمدد مع مرور الزمن. ومِن ثَمَّ فإنه إجمالًا، وبتجاهل كل مواضع الاضطراب المحلية هذه، تندفع أجزاء المادة كلها مبتعدة بعضها عن بعض بسرعة يصفها قانون هابل.

## البحث عن ثابت هابل

إلى الآن ركزتُ حديثي على الصيغة الشكلية الخاصة بقانون هابل، وكيفية تفسيره من الناحية النظرية. لكنْ هناك جانب آخر مهم لقانون هابل تجب مناقشته، وأعني بهذا القيمةَ الخاصة بثابت هابل $H_0$. فثابت هابل هو أحد أهم الأرقام في علم الكونيات، لكنه أيضًا مثال على أحد جوانب القصور لنموذج الانفجار العظيم. فالنظرية لا يمكنها التنبؤ بالقيمة التي يُفترض أن يحملها هذا الرقم؛ إذ إنه جزء من المعلومات التي طُبعتْ في بنية الكون عند بدايته، حيث تنهار نظريتنا. كما أن الحصول على قيمة ثابت هابل عن طريق المشاهدات مُهِمَّةٌ معقدةٌ للغاية. والفلكيون بحاجة إلى نوعين من القياسات؛ أولًا: تكشف المشاهدات الطيفية عن الإزاحة الحمراء للمجرة، وهو ما يشير إلى سرعتها، وهذا الجزء بسيط ومباشر. أما القياس الثاني، الخاص بالمسافة، فهو أصعب كثيرًا في إجرائه.

هَب أنك في حجرة مظلمة موضوع فيها مصباح ضوئي على مسافة غير معروفة منك. كيف يمكنك تحديد المسافة الفاصلة بينك وبينه؟ من الطرق التي يمكنك أن تحاول بها عمل ذلك استخدام نوع من عمليات التثليث. فبإمكانك أن تستخدم أداة مَسْحيَّة، كالمِزواة، وتتحرك في أرجاء الحجرة، وتقيس الزوايا إلى المصباح من مواضع مختلفة، ثم

باستخدام حساب المثلثات تقوم بحساب المسافة. ثمة طريق بديل يتمثل في قياس المسافة باستخدام خواص الضوء المنبعث من المصباح. هَب أنك تعلم أن المصباح طاقته ١٠٠ واط، مثلًا. وهَب أيضًا أنك مزوَّد بمقياس للضوء. من خلال قياس مقدار الضوء الذي تتلقاه باستخدام مقياس الضوء، وتذكُّر أن شدة الضوء تنخفض بالتناسب مع مربع المسافة، ستتمكن من استنتاج المسافة بينك وبين المصباح. لكن إذا لم تكن تعلم مقدَّمًا طاقة المصباح، فلن تُجْدِيَ هذه الطريقة. من ناحية أخرى، إذا كان هناك مصباحان متطابقان في الحجرة، طاقتهما مجهولة لكنْ معروفٌ أن طاقتيهما متطابقتان، فسيكون بإمكانك معرفة المسافات النسبية بينهما بسهولة بالغة. على سبيل المثال، إذا أنتج أحد المصباحين قراءةً ما على مقياس الضوء تَقِل بمقدار أربع مرات عن القراءة التي أنتجها المصباح الثاني، فعندئذٍ من المؤكد أن يكون المصباح الأول على مسافة تبلغ ضعف المسافة إلى المصباح الثاني. لكنك لا تزال غير قادر على أن تعرف بشكل مطلق المسافةَ التي تفصل بينك وبين أيٍّ من المصباحين.

وبوضع هذه الأفكار في سياق فلكي تتضح لنا المشكلات التي تكتنف عملية تحديد نطاق المسافات الخاص بالكون. فعملية التثليث صعبة؛ لأنه ليس من الممكن أن تتحرك كثيرًا نسبة إلى المسافات المراد قياسها، باستثناء مواقف محددة (انظر التالي). وقياس المسافات المطلقة باستخدام النجوم أو غيرها من مصادر الضوء أمر صعب أيضًا ما لم تجِدْ سبيلًا لمعرفة سطوعها الحقيقي (أي مقدار الطاقة الخارج منها). فالنجم الخافت القريب سيبدو مماثلًا لنجم ساطع بعيد؛ نظرًا لأن النجوم، بصفة عامة، لا تستطيع التليسكوبات حتى أقواها تَبيُّنَ مكوناتها الداخلية. لكن إذا علمنا أن نجمين (أو أي مصدرين للضوء) متماثلان، فعندئذٍ لا يكون قياس المسافة بينهما أمرًا صعبًا. وتشكِّل عملية مُعَايرة هذه القياسات النسبية للمسافات المهمةَ الأساسيةَ للدراسات المَعْنِية بنطاقات المسافة الخاصة بالمجرات البعيدة.

لوضع هذه الصعوبات في نصابها الصحيح، علينا أن نتذكر أنه حتى عشرينيات القرن العشرين لم يكن هناك إلا فهم تقريبي وحسب لنطاق حجم الكون. وقبل اكتشاف هابل أن السُّدُم الحلزونية (كما كانت تسمَّى وقتها) كانت تقع خارج مجرة درب التبانة، كان ثمة إجماع على أن الكون كان صغيرًا جدًّا في الواقع. وهذه السدم، المعروف الآن أنها مجرات حلزونية مثل مجرتنا، كان يُنظر إليها بوصفها تمثِّل المراحل المبكرة لتكوُّن البِنَى الشبيهة بمجموعتنا الشمسية. وحين أعلن هابل عن القانون الذي يحمل اسمه،

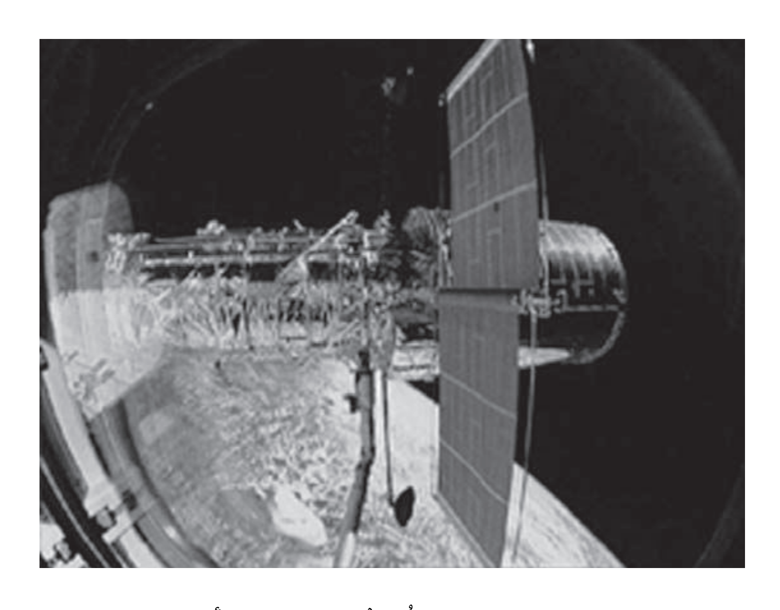
كانت قيمة ثابت هابل التي حصل عليها تبلغ نحو ٥٠٠ كيلومتر في الثانية لكل ميجا فرسخ فلكي (وهي الوحدات المعتادة التي يقاس بها ثابت هابل). وهذا يبلغ نحو ثمانية أضعاف التقديرات الحالية. لقد أخطأ هابل في تحديد نوعية أحد النجوم التي استخدمها كمؤشر للمسافة (انظر التالي)، وحين تم تصحيح خطئه في خمسينيات القرن العشرين على يد فالتر بادي، انخفضت القيمة إلى حوالي ٢٥٠ وحدة من الوحدات عينها. وفي عام ١٩٥٨ أجرى سانديج مزيدًا من التنقيح لهذه القيمة بحيث وصلت إلى ما بين ٥٠ و١٠٠، ولا تزال التقديرات الرصدية الحالية تقع في هذا النطاق.

تستعين القياسات الحديثة لثابت هابل بمجموعة متنوعة من مؤشرات المسافة، وكل مؤشر منها يتقدم بنا خطوة على تدريج المسافات، بداية بالتقديرات المحلية للمسافات إلى النجوم الموجودة داخل مجرة درب التبانة، وانتهاءً بأبعد المجرات والعناقيد المجرِّية. إلا أن الفكرة الأساسية تظل مماثِلة لتلك الفكرة التي كان هابل وسانديج من روَّادِها الأوائل.

أولًا: نستخدم قياسات المسافات الحركية المحلية من أجل إرساء المقياس الخاص بمجرة درب التبانة. لا تعتمد الطرق الحركية على معرفة السطوع المطلق لمصدر الضوء، وهي شبيهة بفكرة التثليث المذكورة سابقًا. بدايةً، من الممكن قياس المسافات إلى النجوم القريبة نسبيًّا باستخدام «التزيُّح المثلثي» للنجم؛ أي التغير في موضع النجم في السماء على مدار عام بسبب حركة الأرض في الفضاء. وقد نشأتْ وحدة المسافات الفلكية التي يستخدمها الفلكيون — الفرسخ الفلكي — من هذه الطريقة؛ فالنجم الذي يبعد فرسخًا فلكيًّا واحدًا يُنتج تزيُّحًا قدْره ثانية قوسية واحدة حين تتحرك الأرض من أحد جانبي الشمس إلى الجانب الآخر، والفرسخ الفلكي الواحد يساوي نحو ثلاث سنوات ضوئية. وقد تمكَّن القمر الصناعي المهم المختص بقياس حركة ومواضع النجوم (هيبارخوس) من الحصول على قياسات التزيُّح الخاصة بآلاف النجوم في مجرتنا.

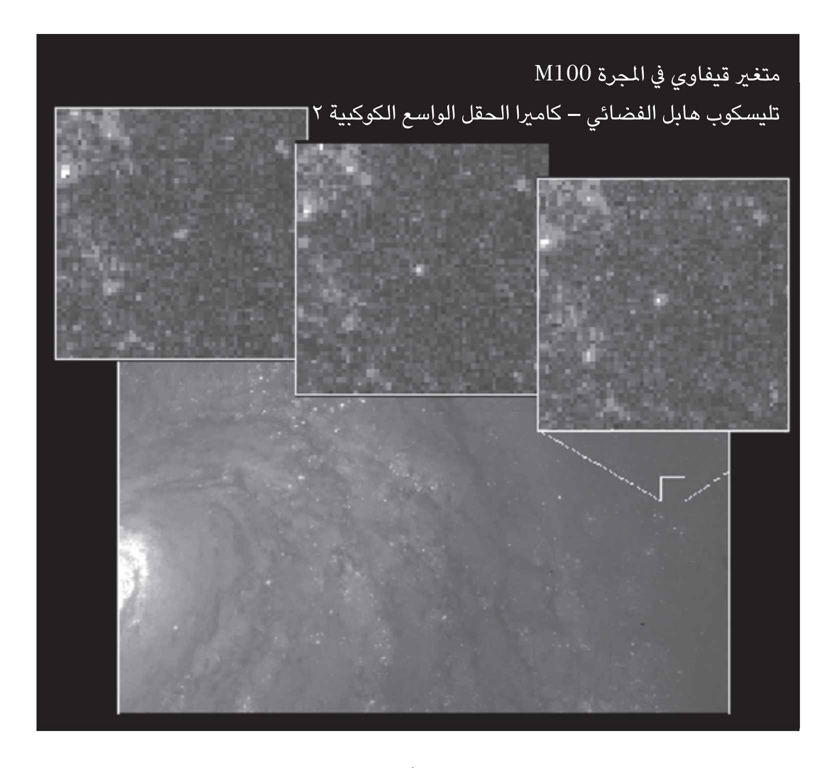
ثمة طبقة أخرى مهمة من مؤشرات المسافة، وهي تلك التي تحتوي على النجوم المتغيرة، وأهم هذه النجوم المتغيرة هي «المتغيرات القيفاوية»؛ إذ إن تغير درجة سطوع هذه النجوم يمنحنا أدلة بشأن سطوعها الحقيقي. والنجوم القيفاوية الكلاسيكية هي نجوم متغيرة ساطعة معروف عنها أنها تُظهر علاقة وثيقة بين فترة تغيرها وبين سطوعها المطلق. ومِن ثَمَّ يمكننا قياس فترة تغيُّر أي نجم قيفاوي بعيد من تقدير قيمة سطوعه المطلق، وبالتالي مسافته. وهذه النجوم ساطعة للغاية، لدرجة أنه يمكن رؤيتها

في مجرات أخرى غير مجرتنا وهي تمد نطاق المسافات حتى نحو ٤ ميجا فرسخ فلكي (أي ٤ ملايين فرسخ فلكي). وكانت الأخطاء في حساب نطاق المسافات الخاص بالنجوم القيفاوية، الناتجة عن امتصاص الضوء في الفضاء بين النجمي، وعن الدوران المجري، وعن الخلط بين النجوم القيفاوية ونوعٍ آخر من النجوم المتغيرة يسمى «شبيه متغير العذراء السادس»؛ مسئولةً عن خروج هابل بتلك القيمة الأصلية الكبيرة لثابت هابل. وتمكننا المؤشرات النجمية الأخرى من بسط سلَّم المسافات النجمية وصولًا إلى ١٠ ميجا فرسخ فلكي. وإجمالًا، يُطلق على هذه السبل اسم «مؤشرات المسافة من الدرجة الأولى».



شكل ٤-٥: تليسكوب هابل الفضائي. التُقطتْ هذه الصورة أثناء انفصال التليسكوب عن المكُّوك الفضائي في عام ١٩٩٠. من أهم المشروعات التي اضطلع بها تليسكوب هابل الفضائي مهمة قياس المسافات إلى النجوم الموجودة في المجرات البعيدة بهدف قياس ثابت هابل.

تتضمن «مؤشرات المسافة من الدرجة الثانية» منطقة الهيدروجين الثنائي (وهي سحب كبيرة من الهيدروجين المؤيَّن تحيط بنجوم شديدة السخونة) والعناقيد الكروية




شكل ٤ -٦: متغير قيفاوي في المجرة M100. التُقطتْ هذه الصور بتليسكوب هابل الفضائي، وتشير الصور الثلاث إلى وجود نجم متغير نعرف الآن أنه متغير قيفاوي. وقد تمكن تليسكوب هابل من قياس المسافة إلى هذه المجرة على نحو مباشر متجنبًا الطرق غير المباشرة التي كانت تُستخدم قبل إطلاق هذا التليسكوب.

(وهي عناقيد تضم من النجوم ما يتراوح بين مائة ألف وعشرة ملايين نجم). تتسم منطقة الهيدروجين الثنائي بأن لها قُطرًا محددًا، فيما تتسم العناقيد الكروية بأن لها سطوعًا مطلقًا، لا يملك إلا مقدارًا ضئيلًا من التشتت حول متوسط هذه الأجرام. وباستخدام مثل هذه المؤشرات النسبية، التي تتم معايرتها باستخدام مؤشرات المسافة من الدرجة الأولى، يمكننا بسط سلم المسافات النجمية حتى نحو ١٠٠ ميجا فرسخ فلكي. أما «مؤشرات المسافة من الدرجة الثالثة» فتتضمن أشد المجرات العنقودية والمستعرات

العظمى سطوعًا. فعناقيد المجرات يمكن أن يحتوي الواحد منها على نحو ألف مجرة، ونجد أن أشد المجرات البيضاوية سطوعًا في أي عنقود مجرِّي غنيٍّ، لها إجمالي سطوع معياري ثابت بدرجة كبيرة، وهو ما يرجع على الأرجح إلى أن هذه المجرات من المعروف أنها تشكلت بطريقة خاصة عن طريق التهام غيرها من المجرات الأخرى. وباستخدام أشد المجرات سطوعًا يمكننا الوصول إلى مسافات قدرها مئات ملايين الفراسخ الفلكية. أما المستعرات العظمى فهي نجوم منفجرة، تنتج سطوعًا مساويًا تقريبًا لسطوع مجرة بأكملها. ومن ثم يمكن رؤية هذه النجوم بسهولة في المجرات البعيدة. وقد تم أيضًا استكشاف العديد من قياسات المسافات غير المباشرة الأخرى، على غرار علاقات الارتباط بين الخصائص الحقيقية المتعددة للمجرات.

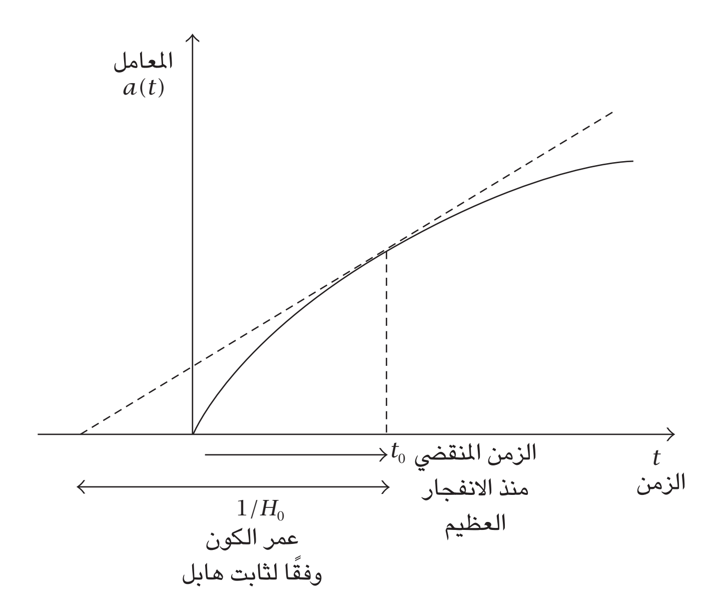
يبدو إذن أنه لا يوجد نقص في الوسائل التي نقيس بها ثابت هابل. لماذا إذن لا تزال قيمة ثابت هابل غير معروفة بدقة؟ إحدى المشكلات هي أن أي خطأ بسيط في أي درجة من درجات سلَّم المسافات النجمية يؤثر بالمثل في المستويات العلوية من السلم بطريقة تراكمية. وعلى كل مستوًى يوجد أيضًا العديد من التعديلات التي يجب عملها؛ كتأثير الدوران المجرِّي في مجرة درب التبانة، والتغيرات في فتحة التليسكوب، وامتصاص الضوء والتعتيم في مجرة درب التبانة، والتحيزات الرصدية بشتى أنواعها. وفي ظل ذلك العدد الكبير من التعديلات غير المؤكدة، قد لا يكون من قبيل المفاجأة أن نكون عاجزين إلى الآن عن تحديد قيمة ثابت هابل بأي قدر من الدقة. لقد أحاط الجدل بمقياس المسافات منذ أيام هابل، لكن يبدو أن نهاية هذا الجدل قد اقتربت؛ وذلك بفضل أحدث التطورات التكنولوجية. وعلى وجه التحديد، يستطيع تليسكوب هابل الفضائي تصوير النجوم، وبالأخص المتغيرات القيفاوية، مباشرة في مجراتها داخل عنقود العذراء المجرِّي، وهي مقدِرة تتخطى مصادر عدم اليقين الرئيسة عند معايرة الدرجات التقليدية في سلم المسافات النجمية. ومن المتوقع لبرنامج تليسكوب هابل الفضائي الأساسي المعنيِّ بنطاق المسافات أن يصوِّب قيمة ثابت هابل حتى دقةٍ قدرُها نحو ١٠ بالمائة. لم يكتمل هذا البرنامج بعدُ، لكن أحدث التقديرات لثابت هابل تستقر حاليًّا عند نطاق يتراوح من ٦٠ إلى ٧٠ كيلومترًا في الثانية لكل ميجا فرسخ فلكي.

## عمر الكون

إذا كان تمدد الكون يسير بمعدل ثابت، فسيكون من اليسير للغاية الربط بين ثابت هابل وبين عمر الكون. إن جميع المجرات يبتعد بعضُها عن بعض في وقتنا الحالي، لكن لا بد أنها كانت في البداية في الموضع ذاته. وكل ما نحتاج إلى عمله هو حساب ذلك الوقت الذي كانت فيه في الموضع ذاته؛ ومن ثم يكون عمر الكون هو الزمن المنقضي منذ وقوع هذا الحدث. إنها عملية حسابية بسيطة، وهي تخبرنا بأن عمر الكون ما هو إلا معكوس ثابت هابل. وفي ضوء التقديرات الحالية لثابت هابل، فإن عمر الكون يبلغ نحو ١٥ مليار عام.

لكن هذه العملية الحسابية لن تكون صحيحة تمامًا إلا في كون خاوٍ تمامًا لا يحتوي على أية مادة تتسبب في تباطؤ معدل تمدده. في نماذج فريدمان، يتباطأ التمدد بمقدار يعتمد على كمِّ المادة التي يحويها الكون. ونحن لا نعلم تحديدًا مقدار التباطؤ الذي يجب وضعه في الاعتبار، لكن من الواضح أن عمر الكون سيكون أقل من القيمة التي حسبناها للتو. وإذا كان التسارع يتباطأ، فلا بد أنه كان أسرع وتيرة في الماضي؛ لذا لا بد أن الكون استغرق وقتًا أقل في الوصول إلى حالته الحالية. لكن تأثير التباطؤ ليس كبيرًا للغاية. ومن المفترض أن يبلغ عمر الكون المنبسط نحو ١٠ مليارات عام.

ثمة وسيلة مستقلة لتحديد عمر الكون تتمثل في تحديد عمر الأجرام التي يحويها. ومن البديهي — ما دام الانفجار العظيم يمثل منشأ المادة كلها بالإضافة إلى الزمكان ذاته — ألَّا يكون هناك شيء «داخل» الكون أكبر عمرًا من الكون ذاته. بَيْدَ أن تحديد عمر الأجرام السماوية ليس بالأمر السهل. فبإمكاننا تحديد عمر الصخور الأرضية باستخدام التحلل الإشعاعي للنظائر طويلة العمر، كاليورانيوم-٢٣٥ الذي تقدر فترة عمر النصف الخاصة به بمليارات الأعوام. هذه الطريقة مفهومة جيدًا، وتشبه استخدام الكربون المُشع في تحديد العمر في مجال علم الآثار، لكن مع وجود اختلاف واحد يتمثل في أن النطاق الزمني الأكبرَ كثيرًا المطلوبَ لتطبيق هذه الطريقة في علم الكونيات يستلزم استخدام عناصر أطول عمرًا بكثير من الكربون-١٤. لكن موطن قصور هذه الطريقة يتمثل في أنها يمكن أن تُستخدم فقط في تحديد عمر الأجرام داخل المجموعة الشمسية فقط. فالصخور القمرية والنيزكية أقدم من المواد الأرضية، لكنها ربما تكونت في وقت حديث للغاية من تاريخ الكون؛ لذا فهي ليست مفيدة على النطاق الفلكي.




شكل ٤ -٧: عمر الكون. سواء أكان الكون منبسطًا أم مفتوحًا أم مغلقًا، فإن نماذج فريدمان دائمًا ما تتباطأ. هذا يعني أن عمر الكون وفقًا لثابت هابل، $1/H_0$، يتجاوز دائمًا الزمن الفعلي المنقضي منذ الانفجار العظيم ($t_0$).

أكثر وسائل قياس عمر الكون فعالية هي وسائل غير مباشرة. وأقوى محددات عمر الكون تأتي من دراسة العناقيد النجمية الكروية؛ فالنجوم في هذه العناقيد يُعتقد أنها تكونت كلها في الوقت عينه، وحقيقة أنها بصفة عامة من النجوم ذات الكتلة المنخفضة للغاية توحي بأن أعمارها كبيرة إلى حدٍّ بعيد. ولأنها تكونت كلها في الوقت عينه، فمن الممكن استخدام مجموعة من هذه النجوم لحساب الكيفية التي تطورت بها. وهذا سوف يعطينا حدًّا أدنى لعمر الكون؛ لأنه لا بد من أن نضع في الحسبان مرور بعض الوقت بعد الانفجار العظيم كي تتكون العناقيد من الأساس. وتقترح الدراسات الحديثة أن هذه المنظومات تبلغ من العمر نحو ١٤ مليار عام، لكن هذا الرقم صار محل خلاف في السنوات الأخيرة.

يمكننا أن نرى أن هذا التقدير يطرح مشكلات فورية أمام نموذج الكون المنبسط. فنجوم العناقيد الكروية أكبر عمرًا من أن تتوافق مع النطاق العمري القصير الذي يقترحه هذا النموذج للكون. وقد دعمت هذه الحجة الزعم بأننا نعيش في واقع الأمر في كون مفتوح. وحديثًا، وعلى نحو يغيِّر من منظورنا جذريًّا، باتت أعمار النجوم القديمة تبدو وكأنها تتوافق على نحو أنِيق مع الأدلة الأخرى التي تقترح أن الكون ربما كان يتسارع في تمدده بدلًا من أن يتباطأ. وسأناقش هذا بمزيد من التفاصيل في الفصل السادس.

الفصل الخامس

# الانفجار العظيم

رغم مرور سنوات عديدة على ظهور الإطار النظري الأساسي لنماذج فريدمان، فإن نظرية الانفجار العظيم لم تظهر إلا على نحو حديث نسبيًّا بوصفها التفسير الإجمالي الأكثر ترجيحًا للكيفية التي تطورت بها محتويات الكون مع مرور الزمن. فلسنوات عدة، فضَّل أغلب علماء الكونيات نموذجًا بديلًا يسمى نموذج الحالة الثابتة. وفي الواقع، لنظرية الانفجار العظيم ذاتها صور مختلفة، ومن الأدق أن نطلق على هذه النظرية الحديثة اسم نظرية الانفجار العظيم الحار؛ للتفرقة بينها وبين نظرية أخرى أقدم كانت منافسة لها (وهي المرفوضة حاليًّا) كانت تفترض وجود مرحلة مبدئية باردة. وكما ذكرتُ بالفعل، ليس من الصحيح تمامًا إطلاق مسمى «نظرية» على نموذج الانفجار العظيم؛ فالفارق بين النظرية والنموذج فارق طفيف، لكنَّ ثمة تعريفًا قد يُفيد هنا، وهو يقضي بأن النظرية من المتوقع عادةً أن تكون مستقلة بذاتها تمامًا (بمعنى ألَّا يكون فيها متغيرات قابلة للضبط، وأن تكون كل الكميات الرياضية فيها محدَّدةً من قبل)، أما النموذج فليس تامًّا على النحو ذاته. وبسبب المراحل المبدئية التي يشوبها عدم اليقين في الانفجار العظيم، من الصعب عمل تنبؤات قوية مدعومة بالدليل؛ ومِن ثَمَّ ليس من السهل اختبار صحتها. وقد وجَّه أنصار نظرية الحالة الثابتة هذا الانتقاد في العديد من المناسبات. ومن قبيل المفارقة أن مصطلح الانفجار العظيم كان مقصودًا منه في البداية الحطُّ من شأن هذه الفكرة، وكان أول مَن صاغَه — وذلك في برنامج إذاعي على شبكة الإذاعة البريطانية — هو السير فريد هويل، أحد أبرز معارضي نظرية الانفجار العظيم.

## نظرية الحالة الثابتة

في نموذج الحالة الثابتة الكوني، الذي اقترحه كلٌّ من توماس جولد وفريد هويل وهيرمان بوندي وجايانت نارليكار (ضمن آخرين)، فإن الكون يتمدد، لكنه مع ذلك يمتلك الخواص عينها طوال الوقت. والمبدأ الذي ترتكز عليه هذه النظرية يُدعَى «المبدأ الكوني المثالي»، وهو تعميم للمبدأ الكوني الذي يقضي بأن الكون متجانس ومتوحد الخواص في المكان، بحيث ينسحب التجانس على الزمن أيضًا.

ولأن كل خصائص علم كونيات الحالة الثابتة يجب أن تكون ثابتة مع مرور الزمن، فإن معدل التمدد في هذا النموذج ثابت أيضًا. من الممكن أن نجد حلًّا لمعادلات أينشتاين يتوافق مع هذه الفكرة، ويُطلَق على هذا الحل اسم «حل دي سيتر». لكن إذا كان الكون آخذًا في التمدد، فلا بد أن تتناقص كثافة المادة مع الوقت، أم هذا غيرُ ضروري؟ تفترض نظرية الحالة الثابتة وجود مجال يسمَّى «المجال سي»، يخلق المادة بمعدل ثابت لمعادلة تخفيف كثافة المادة الذي يسببه التمدد الكوني. وهذه العملية، المسماة «الخلق المستمر»، لم يجرِ قطُّ رصدُها في المختبرات، لكن معدل الخلق المطلوب صغير للغاية (حوالي ذرة هيدروجين واحدة لكل متر مكعب على مدار عمر الكون)، لدرجة أنه من العسير أن نستبعد بالملاحظة المباشرة وجود الخلق المستمر بوصفها عملية فيزيائية ممكنة.

في نظر العديد من المنظِّرين كانت نظرية الحالة الثابتة هي الأفضل؛ لأنه كان من الأسهل اختبارها مقارنة بغيرها من النظريات المنافِسة. فعلى وجه التحديد، من شأن أي دليل يُثبِت أن الكون في الماضي كان مختلفًا عما هو عليه الآن أن يُثبِت خطأ هذا النموذج. ومنذ أواخر أربعينيات القرن العشرين فصاعدًا، حاول الراصدون معرفة هل كانت خصائص المجرات البعيدة (التي نراها على حالها في الماضي) مختلفة عن المجرات القريبة. كانت هذه المشاهدات صعبة، وأدَّت المشكلات التي اكتنفتْ تفسير المشاهدات إلى نشوب خلافات حادة بين مؤيدي نظرية الحالة الثابتة ومعارضيها، ومثال على هذا ذلك التشاحن المرير الذي نشب بين المتخصص في علم الفلك الراديوي مارتن رايل وبين فريد هويل، حين زعم رايل أنه وجد تطورًا له اعتباره في خصائص مصادر موجات الراديو. وتعين الانتظار حتى منتصف الستينيات حين أدَّى اكتشافٌ عارضٌ جرى بمحض المصادفة إلى حسم هذا الجدل.

## الدليل الحاسم

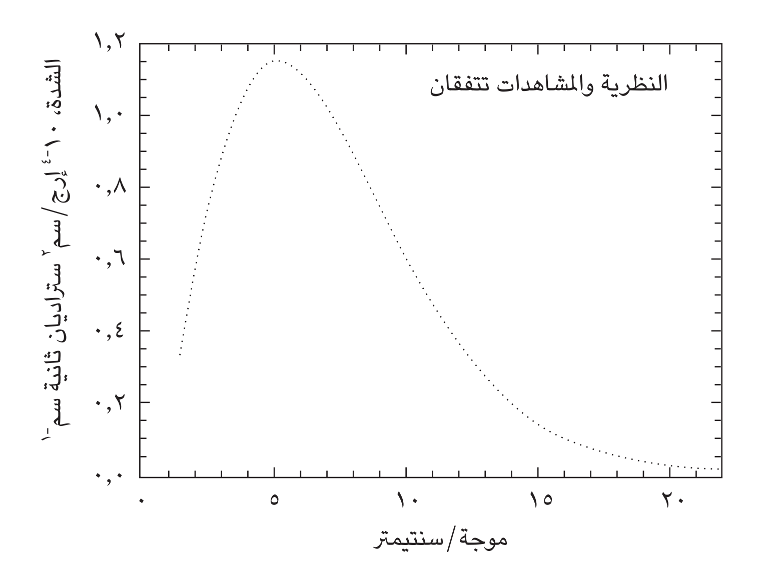
في أوائل الستينيات كان اثنان من الفيزيائيين، وهما أرنو بنزياس وروبرت ويلسون، يستخدمان هوائيًّا مخروطيَّ الشكل خاصًّا باستشعار الموجات الميكرونية متخلفًا عن اختبارات أحد الأقمار الصناعية اللاسلكية؛ بهدف دراسة الانبعاثات التي ينتجها الغلاف الجوي للأرض. كان التليسكوب مصمَّمًا لدراسة مصادر التداخل المحتملة التي قد تسبب مشكلات لمنظومات الاتصالات عبر الأقمار الصناعية المخطَّط لها. وقد فوجئ بنزياس وويلسون حين وجدا ضوضاء منتظمة في الخلفية، لا يمكن التخلص منها. وفي النهاية، بعد الكثير من الفحص والتخلص من الحَمَام الذي كان يبني أعشاشه داخل التليسكوب، تقبَّلا فكرة أن هذه الضوضاء لن تختفي أبدًا. ومن قبيل المصادفة أنه بالقرب منهما في جامعة برينستون في نيوجيرسي، كانت مجموعة من الفيزيائيين الفلكيين، من بينهم روبرت هنري ديك وجيمس بيبلز، تحاول تصميم تجربة لرصد الإشعاع الذي أنتجه الانفجار العظيم. وقد أدرك أفراد المجموعة أن هناك مَن سبقهم إلى هذا. ونشر بنزياس وويلسون نتائجهما في دورية الفيزياء الفلكية عام ١٩٦٥، إلى جانب ورقة بحثية من مجموعة ديك تفسِّر ما تعنيه هذه النتائج. وفي عام ١٩٧٨ فاز كلٌّ من بنزياس وويلسون بجائزة نوبل.

منذ اكتشاف الخلفية الميكرونية وهي عُرْضة للبحث الدقيق، وقد بتْنا الآن نعلم عنها أكثر بكثير مما كان معلومًا في عام ١٩٦٥. كان بنزياس وويلسون قد لاحظا أن الضوضاء التي اكتشفاها لا تعتمد شدتها على وقت اليوم، وهو ما يمكن للمرء أن يتوقعه لو أنها ظاهرة مرتبطة بالغلاف الجوي. في الواقع، إن درجة الانتظام التي يتسم بها إشعاع الخلفية الميكروني تُبَيِّن أنه ليس مرتبطًا بأي مصادر من داخل مجرتنا (التي لن تكون موزعة بالتساوي في السماء). من المؤكد إذن أن إشعاع الخلفية هذا قادم من خارج المجرة. والأكثر أهمية أنه صار معلومًا الآن أن هذا الإشعاع له نوع خاص للغاية من الطيف يطلق عليه طيف الجسم الأسود. ينشأ طيف الجسم الأسود متى كان المصدر يمتص الإشعاع ويُطْلقه على نحو مثالي. والإشعاع المنتَج بواسطة الجسم الأسود عادةً ما يسمى إشعاعًا حراريًّا؛ لأن الامتصاص والإطلاق المثاليَّين يجعلان المصدر والإشعاع في حالة من التوازن الحراري.

يُظهِر طيفُ الجسم الأسود المعتاد لهذا الإشعاع، بما لا يدعُ مجالًا للشك، أن هذا الإشعاع أُنتج في ظروف من التوازن الحراري في المراحل المبكرة للغاية لكرة النار البدائية.

في وقتنا الحالي الخلفية الميكرونية باردة للغاية؛ فحرارتها تقل عن ثلاث درجات فوق الصفر المطلق. بَيْدَ أن هذا الإشعاع أخذ في البرودة تدريجيًّا كتأثير لتمدد الكون؛ إذ عانى كل فوتون من الفوتونات المكوِّنة له من تأثير الإزاحة الحمراء. وبإرجاع عقارب الساعة إلى المراحل المبكرة من تطور الكون، نجد أن هذه الفوتونات كانت أشد حرارة، وتحمِل طاقة أعلى. وفي النهاية سنصل إلى مرحلة كان فيها للإشعاع تأثيرٌ عنيف على المادة. يتألف الغاز في المعتاد من ذرات، وهذه الذرات تتكون من إلكترونات تدور حول نواة مركزية، لكن في المجالات الإشعاعية الشديدة، تُنتزع الإلكترونات من الذرات مكوِّنة حالة البلازما، التي فيها يقال إن المادة تكون مؤيَّنة. وقد حدث هذا بعد مرور ٣٠٠ ألف عام على الانفجار العظيم، حين كانت درجات الحرارة تبلغ عدة آلاف درجة مئوية، وكان الكون أصغر مما هو عليه اليوم بألف مرة، وأشد كثافة بمليار مرة. في هذه الفترة كان الكون بأسره حارًّا كسطح الشمس (الذي، بالمناسبة، يُنتج إشعاعًا يقترب من إشعاع الجسم الأسود). في ظل ظروف التأيُّن الكامل، تمر المادة (خاصة الإلكترونات الحُرَّة) والإشعاع بتصادمات سريعة تحافظ على التوازن الحراري. ومن ثم يكون الكون مُعْتمًا غير شفَّاف للضوء حين يكون في حالة تأيُّن. ومع تمدد الكون وانخفاض حرارته، تعاود الإلكترونات الاتحاد بالنَّوَى مُكَوِّنة ذرات، وحين يحدث هذا فإن تشتت الفوتونات يكون أقل كفاءة بكثير. في الواقع، يصير الكون شفَّافًا على نحو فعلي بعد إعادة الاتحاد، ومن ثم فإن ما نرصده من إشعاع الخلفية الميكروني اليوم هو الأثر البارد لآخِر الإشعاع الذي تشتَّت بواسطة الإلكترونات في حقبة إعادة الاتحاد. وحين تحرَّر الإشعاع أخيرًا من عمليات التشتت، كان وقتها في نطاق الضوء المرئي أو فوق البنفسجي من الطيف، لكن منذ ذلك الوقت ظل هذا الإشعاع يشهد إزاحة حمراء بفعل تمدد الكون، وهو الآن يُرصَد في نطاق الأطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء أو الميكرونية.

وبسبب توحد الخواص شبه التام لإشعاع الخلفية الميكروني الكوني في السماء، فإنه يُعَدُّ دليلًا مؤيدًا للمبدأ الكوني. كما أنه يقدِّم مؤشرات على منشأ المجرات والعناقيد المجرِّية. لكن أهميته في هيكل نظرية الانفجار العظيم تفوق كلَّ هذا بكثير؛ فوجود إشعاع الخلفية الميكروني يمكِّن علماء الكونيات من استنتاج الظروف التي كانت حاضرة في المراحل المبكرة من الانفجار العظيم، ويساعد تحديدًا في تفسير كيمياء الكون.




شكل ٥-١: طيف الخلفية الميكرونية الكونية. يبين هذا المخطط الشدة المَقيسة لإشعاع الخلفية الميكروني الكوني على صورة دالة للطول الموجي. يُظهر الشكل كلًّا من النظرية والقياسات، والاتفاق بينهما تامٌّ للغاية، لدرجة أن المنحنيين يقعان في الموضع ذاته. هذا السلوك المثالي للجسم الأسود هو الدليل الأقوى على أن الكون بدأ بانفجار عظيم حار.

## التخليق النووي

إن التركيب الكيميائي للكون بسيط للغاية في جوهره؛ فالسواد الأعظم من مادة الكون المعروفة هو على صورة هيدروجين، أبسط العناصر الكيميائية قاطبة، وتتكون نواة ذرته من بروتون وحيد. أكثر من ٧٥ بالمائة من مادة الكون موجود على هذه الصورة البسيطة. وإلى جانب الهيدروجين، فإن ٢٥ بالمائة من المكونات المادية للكون (من حيث الكتلة) موجودة على صورة هليوم-٤، وهو نظير مستقر للهليوم يُوجَد بنواة ذرته بروتونان ونيوترونان. وبمقدارٍ أشدَّ ندرةً من هذا بمائة ألف مرة هناك عنصران آخران عجيبان، وهما الديوتيريوم، أو الهيدروجين الثقيل كما يطلَق عليه أحيانًا، وتتكون نواته من بروتون واحد ونيوترون واحد، والنظير الأخف للهليوم المسمى الهليوم-٣، الذي تقل

النيوترونات في نواته بمقدار نيوترون واحد عن الهليوم العادي. وأخيرًا هناك الليثيوم-٧، والمُنتَج بمقدار ضئيل، وتصل نسبة توفره إلى جزء واحد في العشرة مليارات من نسبة توفر الهيدروجين. من أين جاء هذا الخليط الكيميائي؟

معروف منذ ثلاثينيات القرن العشرين أن آلية عمل النجوم تعتمد على حرق الهيدروجين بوصفه نوعًا من الوقود النووي. وكجزء من هذه العملية تُخلِّق النجوم الهليوم وغيره من العناصر. بَيْدَ أننا نعلم أن النجوم وحدها لا يمكن أن تكون مسئولة عن إنتاج هذا المزيج من العناصر الخفيفة التي وصفتُها توًّا. بادئ ذي بدء، تتضمن العمليات التي تجري داخل النجوم في المعتاد تدميرَ الديوتيريوم بمعدل يفوق معدل إنتاجه؛ لأن المجالات الإشعاعية القوية داخل النجوم تكسِّر الديوتيريوم إلى مكوناته من بروتونات ونيوترونات. وبالنسبة إلى العناصر الأثقل من الهليوم-٤ فهي تتكون بسهولة نسبية في قلوب النجوم، لكن نسبة الهليوم-٤ المرصودة أعلى بكثير مما يمكن تفسيره من خلال التنبؤات المعتادة لتطور النجوم.

ومن المثير للاهتمام أن صعوبة تفسير وفرة الهليوم من خلال العمليات التي تجري داخل النجوم وحدها أُدركتْ في وقت مبكر يرجع إلى أربعينيات القرن العشرين، وذلك على يد كلٍّ مِن رالف ألفر وهانز بيته وجورج جاموف الذين اقترحوا هم أنفسهم نموذجًا تحدث فيه عملية التخليق النووي في المراحل المبكرة من تطور الكون. وقد أقنعتِ الصعوباتُ التي اكتنفتْ هذا النموذج، وتحديدًا الإنتاج الوفير للهليوم، كلًّا من ألفر وهيرمان في عام ١٩٤٨ بتدبر فكرة وجود خلفية إشعاعية كونية قوية في حقبة التخليق النووي. وقد قدَّرا أن هذه الخلفية من المفترض أن تبلغ درجة حرارتها الحالية نحو ٥ درجات كلفينية، وهي قيمة ليست بعيدة عن القيمة المعروفة لهذه الخلفية حاليًّا، رغم أن الأمر تطلَّب مرور خمسة عشر عامًا حتى اكتشاف إشعاع الخلفية الميكروني الكوني.

إن حساب المقادير النسبية للنوى الخفيفة المنتجة في كرة النار البدائية يتطلب عمل بعض الافتراضات بشأن بعض خصائص الكون في المرحلة المَعْنِية من تطوره. وبالإضافة إلى الافتراضات الطبيعية الموجودة داخل نماذج فريدمان، نحتاج بالضرورة أن يكون الكون في بداياته قد مر بمرحلة من التوازن الحراري على درجات حرارة تزيد عن المليار درجة. ووفق نموذج الانفجار العظيم فإن هذا حدث في وقت مبكر جدًّا من عمر الكون، بعد بضع ثوانٍ من بدايته. من ناحية أخرى، الحسابات بسيطة ومباشرة، ومن الممكن

إجراؤها باستخدام أكواد حاسوبية مطوَّرة بالأساس بهدف نمذجة الانفجارات النووية الحرارية.

قبل أن تبدأ عملية تخليق النوى، تواصل البروتونات تحوُّلها إلى نيوترونات والعكس بالعكس بفعل التفاعلات النووية الضعيفة (ستُوصَف التفاعلات الضعيفة تفصيلًا في موضع لاحق). ومن الممكن حساب الأعداد النسبية للبروتونات والنيوترونات ما دامت في حالة توازن حراري، ورغم أن التفاعلات الضعيفة تكون من السرعة بما يكفي للحفاظ على حالة التوازن الحراري فإن نسبة البروتونات إلى النيوترونات تُواصل تعديل نفسها بالتوافق مع البيئة المحيطة الآخذة في البرودة. لكن عند نقطة حرجة معينة، تصير التفاعلات الضعيفة غير فعالة، ويستحيل ضبط النسبة أكثر من ذلك. وما يحدث هو أن نسبة البروتونات إلى النيوترونات «تتجمد» عند قيمة مُعَينة (تبلغ نحو نيوترون واحد مقابل كل ستة بروتونات)، وهذه النسبة لها أهمية جوهرية في تحديد الوفرة النهائية للهليوم-٤. فلتخليق الهليوم عن طريق الجمع بين البروتونات والنيوترونات معًا علينا أولًا تخليق الديوتيريوم. لكن كما ذكرتُ من قبل فإن ذرات الديوتيريوم يسهل تمزيقها بفعل الإشعاع؛ فإذا ضُربتْ ذرة ديوتيريوم بفوتون واحد، فستتفكك إلى بروتون ونيوترون منفصلين. وحين يكون الكون حارًّا جدًّا، تُدمَّر أي ذرات ديوتيريوم بمجرد تخليقها، ويطلَق على هذا اسم «عنق زجاجة الديوتيريوم». وما دام هذا الاختناق المروري النووي موجودًا، لا يمكن تخليق أي ذرة هليوم. علاوة على ذلك فإن النيوترونات التي تجمدت قبل ذلك ستبدأ في التحلل هي الأخرى بفترة عمر نصف قدرها عشر دقائق. ومن ثم تكون نتيجة التحلل هي وجود عدد قليل نسبيًّا من النيوترونات المتاحة للتخليق اللاحق للهليوم.

لكن حين تقل درجة حرارة الإشعاع عن المليار درجة، لا يكون الإشعاع بالقوة الكافية لتفكيك الديوتيريوم، ويظل حاضرًا لوقت طويل بما يكفي كي تحدث تفاعلات أخرى. ومن الممكن أن تتلاحم ذرتا ديوتيريوم كي تُكَوِّنا الهليوم-٣، مع إطلاق نيوترون. ويستطيع الهليوم-٣ اقتناص نواة ديوتيريوم وتكوين ذرة هليوم-٤، مع إطلاق بروتون. وهذان التفاعلان يحدثان بسرعة كبيرة جدًّا، وتكون النتيجة أن كل النيوترونات تقريبًا ينتهي بها الحال داخل ذرات الهليوم-٤، ولا يُنتَج إلا آثار بسيطة من العنصرين الوسيطين في هذه العملية؛ الديوتيريوم والهليوم-٣. إن وفرة الكتلة للهليوم-٤ التي تنتج بصورة طبيعية تُمثِّل نحو ٢٥ بالمائة، وهو الرقم المطلوب تحديدًا. وبالمثل، تقترب

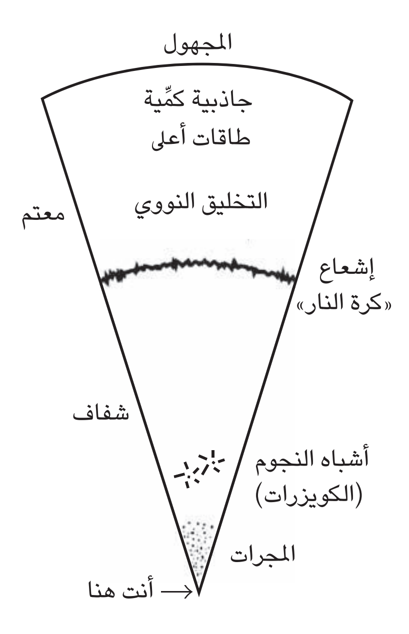
مقادير الذرات الوسيطة أيضًا من المشاهدات. وكل هذا جرى في الدقائق القليلة الأولى من عمر كرة النار البدائية.

يبدو هذا نجاحًا ساحقًا للنظرية، وهو كذلك بالفعل. بَيْدَ أن الاتفاق بين الحسابات التفصيلية للنواتج النووية المتخلفة عن الانفجار العظيم وبين وفرة العناصر المرصودة؛ لا يتحقق إلا في حالة قيمة معينة لأحد المؤشرات الحساسة: نسبة الباريونات إلى الفوتونات في الكون. فالأمر كله لا ينجح إلا حين يكون هذا الرقم في حدود واحد لكل عشرة مليارات؛ بمعنى بروتون أو نيوترون واحد مقابل كل عشرة مليارات فوتون. وبإمكاننا استخدام درجة الحرارة المعروفة للخلفية الميكرونية في حساب عدد الفوتونات الموجودة في الكون. ويمكن أن يَجري هذا الحساب على نحو دقيق للغاية. وبما أننا نعرف نسبة الباريونات إلى الفوتونات المطلوبة كي يعمل التخليق النووي بنجاح، فيمكننا استخدام القيمة الملائمة لحساب عدد الباريونات. والنتيجة ضئيلة؛ فمقدار المادة الموجودة في صورة باريونات لا يمكن أن يتخطَّى نسبة مئوية ضئيلة من مقدار الكتلة التي يتطلبها الكون المغلق.

## إرجاع عقارب الساعة إلى الوراء

يُعَدُّ إنتاج الخلفية الميكرونية إبَّان حقبة إعادة الاتحاد، وتخليق العناصر خلال حقبة كرة النار النووية، نجاحين كبيرين لنظرية الانفجار العظيم. والكيفية التي تتفق بها المشاهدات مع الحسابات التفصيلية تدعم هذا النموذج بقوة. وارتكازًا على هذه النجاحات، عكف علماء الكونيات منذ ذلك الحين على محاولة استخدام نظرية الانفجار العظيم في استكشاف التبعات الأخرى على المادة عند درجات الحرارة والكثافة المرتفعة للغاية. وفي هذا النشاط، تستغل نظرية الانفجار العظيم العلاقة بين عالم البِنَى الكبيرة للغاية وعالم البِنَى الصغيرة للغاية.

كلما تعمقنا في دراسة الماضي، صار الكون أصغر حجمًا وأشد حرارة. فنحن نعيش في حقبة أعقبت الانفجار العظيم بخمسة عشر مليار عام، وقد أُنتجت الخلفية الميكرونية بعد الانفجار العظيم بثلاثمائة ألف عام، وأجرى الأتون النووي عملية تخليق العناصر في الدقائق القليلة الأولى من عمر الكون. وكي نبسِّط فهمنا نحو الأزمنة المبكرة من عمر الكون، علينا معرفة كيفية سلوك المادة عند طاقات تزيد على تلك المتحققةِ داخل المفاعلات النووية. وليس من الممكن عمل التجارب القادرة على سبر أغوار هذه النطاقات




شكل ٥ -٢: العودة بالزمن إلى الوراء. بينما نتوغل بنظرنا في الفضاء، فإننا في حقيقة الأمر نعود بالزمن إلى الوراء. بالقرب منا نسبيًّا نرى المجرات. وأبعد منها يمكننا أن نرى المجرات الشديدة النشاط المعروفة باسم أشباه النجوم (الكويزرات). وراء ذلك هناك «العصور المظلمة»؛ إذ يصير الرجوع بالزمن عظيمًا لدرجة أننا نرى الكون قبل تكوُّن المجرات. وفي النهاية ننظر بعيدًا جدًّا لدرجة أن الكون من شدة حرارته كان كرة نار مُعتمة تشبه كثيرًا الأجزاء المركزية لنجم من النجوم. يأتينا إشعاع كرة النار عبر الكون المتمدد ويصلنا على صورة خلفية ميكرونية. وإذا كان بإمكاننا أن ننظر أبعد من ذلك، فسنرى التفاعلات النووية وهي تحدث، مثلما تحدث داخل النجوم. وفي الأوقات المبكرة عن ذلك تصير الطاقات مرتفعة للغاية بما يحتِّم علينا الاعتماد على التخمين وحسب. وأخيرًا، نصل إلى حافَة الكون ... وحين تصير الجاذبية الكَمِّيَّة صاحبةَ الكلمة العليا فإننا لا نعلم شيئًا.

الهائلة للطاقة إلا بتكاليف ضخمة. فبمقدور معجلات الجسيمات على غرار تلك الموجودة في سيرن بجنيف أن تعيد خلق بعض جوانب ذلك الأتون البدائي، بَيْدَ أن معرفتنا بكيفية

سلوك المادة في ظل هذه الظروف المتطرفة لا تزال معرفة منقوصة، ولا تمتد حتى الفترات المبكرة للغاية فيما وراء حقبة التخليق النووي.

في البداية رأى الفيزيائيون في الانفجار العظيم متسعًا يمكِّنهم من تطبيق نظرياتهم. لكن في الوقت الحالي، في ظل عدم اختبار نظريات فيزياء الجسيمات بدرجة كبيرة في مواضع أخرى، صار الانفجار العظيم ساحة اختبار هذه النظريات. ولمعرفة الكيفية التي حدث بها هذا، علينا أن نفهم تطور فيزياء الجسيمات على مدار الأعوام الأربعين الماضية.

## قوى الطبيعة الأربع

متسلحينَ بنظريتَيِ النسبية وميكانيكا الكم الجديدتين، ومدفوعينَ في بعض الحالات بالاكتشافات الجديدة التي وُلدت من رحم إنجازات التكنولوجيا التجريبية، سعى الفيزيائيون في هذا القرن إلى بسط نطاق العلم لوصف كل أوجه العالم الطبيعي. وكل الظواهر الخاضعة لهذا المبحث من الممكن عَزْوُها إلى أفعال قوى الطبيعة الأربع. وهذه التفاعلات الجوهرية الأربعة هي السُّبُل التي بواسطتها تتفاعل الجسيمات العديدة الأولية — التي تتكون منها المادة بكل صورها — بعضها مع بعض. ناقشتُ بالفعل قوتين من هذه القوى الأربع، وأعني بهذا المغناطيسية والجاذبية. أما القوتان الأخريان فتختصان بالتفاعلات الواقعة بين مكونات نوى الذرات، وهما القوة النووية الضعيفة والقوة النووية القوية. تتفاوت القوى الأربع في القوة (الجاذبية أضعفها، والقوى النووية القوية أقواها) وتتباين أيضًا من حيث أنواع الجسيمات الأساسية التي تشارك في التفاعلات التي تهيمن عليها.

تُبقي القوة الكهرومغناطيسية على الإلكترونات في مداراتها حول نواة الذرة؛ ومن ثم فهي المسئولة عن تماسك كل أشكال المادة المألوفة لدينا. لكن أُدرِكَ في وقت مبكر من القرن العشرين أنه من أجل تطبيق نظرية ماكسويل تفصيلًا على الذرات، لا مناص من الاستعانة بأفكار من فيزياء الجسيمات ومن النسبية. وتعيَّن الانتظار حتى أعمال ريتشارد فاينمان وآخرين، المبنية على عمل ديراك؛ حتى يتم تطوير النظرية الكمية الكاملة للقوة الكهرومغناطيسية، المسماة «الكهروديناميكا الكمية». ووفق هذه النظرية، يكون الإشعاع الكهرومغناطيسي على صورة فوتونات هو المسئول عن حمل التفاعل الكهرومغناطيسي بين الجسيمات ذات الشحنات المختلفة.

قبل المُضي أكثر من هذا في مناقشة التفاعلات، من الملائم الحديث عن بعض خصائص الجسيمات الأساسية التي تعمل هذه القوى بينها. أول هذه الجسيمات هي المجموعة المسماة «الفرميونات»، وهذه تختلف عن حاملات القوى، أو «البوزونات» (كالفوتونات)، بفعل لفها المغزلي. وتنقسم الفرميونات إلى فئتين؛ اللبتونات والكواركات، وكل فئة من هاتين الفئتين تنقسم بدورها إلى ثلاثة أجيال، وكل جيل يحتوي على جسيمين اثنين. ومن ثم يكون لدينا إجمالًا ستة فرميونات (مُرتَّبة في ثلاثة أزواج). أحد فردي كل زوج من الفرميونات يكون مشحونًا (الإلكترون على سبيل المثال)، بينما يكون الآخر عديم الشحنة، ويطلق عليه اسم «نيوترينو». ورغم أن الإلكترون مستقر، فإن اللبتونين الآخرين المشحونين (ويسميان «الميوون» و«التاوون») يتحللان بسرعة كبيرة، ومن ثم يكون رصدهما أكثر صعوبة بكثير.

الكواركات كلها مشحونة، وعائلاتها الثلاثة مُرتَّبة في أزواج هي الأخرى. أُولى العائلات تحتوي على الكواركات «العلوية» والكواركات «السفلية»، والثانية من الكواركات «الغريبة» والكواركات «الساحرة»، والثالثة من الكواركات «القاعية» والكواركات «القمية». والكواركات تكون على الدوام حبيسة داخل جسيمات مركبة تسمى «الهادرونات». وهذه الجسيمات تتضمن «الباريونات»، وهي تجميعات من ثلاثة كواركات، أشهر الأمثلة عليها البروتونات والنيوترونات. هناك حالات أخرى عديدة للهادرونات، لكن أغلبها غير مستقر بدرجة شديدة. ومن الممكن أن تُنتَج الهادرونات داخل تجارب المعجلات (أو في الانفجار العظيم) لكنها لا تستمر في البقاء لفترة طويلة قبل أن تتحلل. ووفق فهمنا الحالي يبدو أنه في غضون جزء على المليون من الثانية من بداية الزمن باتت الكواركات تملك الطاقة الكافية كي تحرر نفسها. أما فيما قبل ذلك فتتحلل الجسيمات الهادرونية إلى «حساء» من الكواركات.

كل جسيم من الفرميونات له نظير معاكس يسمى الجسيم المضاد. والجسيم المضاد للإلكترون هو البوزيترون، وهناك أيضًا الكواركات المضادة والنيوترينوات المضادة.

تصف نظرية الكهروديناميكا الكمية التفاعلات بين الفرميونات المشحونة. كانت ثاني قوة يُلقَى عليها الضوء هي القوة النووية الضعيفة، المسئولة عن تحلل مواد إشعاعية معينة. يتضمن التفاعل الضعيف كل أنواع الفرميونات، بما فيها النيوترينوات التي تعجز عن أن تستشعر تفاعل الكهروديناميكا الكمية بسبب كونها عديمة الشحنة. وكما في حالة الكهرومغناطيسية، تُنقَل القوى الضعيفة بين الجسيمات بواسطة جسيمات

**الجسيمات الأساسية**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| الكواركات | $u$ علوي | $c$ ساحر | $t$ قمي | $\gamma$ فوتون | حاملات القوى |
| | $d$ سفلي | $s$ غريب | $b$ قاعي | $g$ جلوون | |
| اللبتونات | $\nu_e$ نيوترينو إلكتروني | $\nu_\mu$ نيوترينو ميووني | $\nu_\tau$ نيوترينو تاووني | $Z$ بوزون $Z$ | |
| | $e$ إلكترون | $\mu$ ميوون | $\tau$ تاوون | $W$ بوزون $W$ | |
| | ١ | ٢ | ٣ | | |

ثلاثة أجيال للمادة

شكل ٥ -٣: الوحدات البنائية للمادة. يتكون النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات من عدد صغير نسبيًّا من الجسيمات الأساسية. هناك الكواركات المرتبة في ثلاثة أجيال يحتوي كل جيل منها على كواركين، وتتكون الجسيمات النووية الثقيلة من هذه الكواركات. اللبتونات مرتبة على نحو مشابه. الكواركات واللبتونات تكوِّن معًا الفرميونات، وتُنقَل القوى بينها بواسطة بوزونات (إلى اليمين) تسمى الفوتونات والجلوونات والبوزونات $W$ و$Z$ الضعيفة.

أخرى، لكنها في هذه الحالة ليست الفوتونات، وإنما جسيمات ضخمة تسمى البوزونات $W$ والبوزونات $Z$. ويُعدُّ تمتع هذه الجسيمات بكتلة (على العكس من الفوتون) هو السببَ وراء أن للقوة الضعيفة مثلَ هذا النطاق القصير، وأن تأثيراتها محصورة داخل النطاقات الضئيلة لنواة الذرة. وخلافًا لذلك تلعب الجسيمات $W$ و$Z$ في هذا السياق نفس الدور الذي تلعبه الفوتونات في الكهروديناميكا الكمية؛ فهذه البوزونات والفوتونات أمثلة على ما يعرف باسم «البوزونات العيارية».

تسمى النظرية المَعْنِية بالتفاعلات القوية، تلك التفاعلات المسئولة عن تماسك الكواركات داخل الهادرونات، باسم «الديناميكا اللونية الكمية»، وهي مبنية على أسس مشابهة للكهروديناميكا الكمية. في الديناميكا اللونية الكمية توجد مجموعة أخرى من

البوزونات العيارية تختص بتوصيل القوى، وهذه البوزونات تسمى «الجلوونات»، وثمة ثمانية أنواع منها. إضافة إلى هذا، للديناميكا اللونية الكمية خاصية تسمى «اللون»، وهي تلعب دورًا مشابهًا للدور الذي تلعبه الشحنة الكهربية في الكهروديناميكا الكمية.

## الدافع نحو التوحيد

هل من الممكن — اقتداءً بما فعله ماكسويل من توحيد عظيم الأثر للقوتين الكهربية والمغناطيسية في القرن التاسع عشر — أن نجمع بين الكهروديناميكا الكمية والتفاعلات الضعيفة والديناميكا اللونية الكمية في نظرية واحدة واسعة النطاق؟

طُوِّرت نظرية توحد القوة الكهرومغناطيسية مع القوة النووية الضعيفة نحو عام ١٩٧٠ على يد كلٍّ من شيلدون جلاشو ومحمد عبد السلام وستيفن واينبرج. وتقضي هذه النظرية، المسماة بنظرية القوة الكهروضعيفة، بأن هاتين القوتين المنفصلتين ما هما إلا تجسيدان منخفضا الطاقة لقوة واحدة. فحين تمتلك الجسيمات طاقة منخفضة، وتتحرك في بطء، فإنها تستشعر الطبيعة المتباينة للقوتين الضعيفة والكهرومغناطيسية. ويقول الفيزيائيون إنه عند مستويات الطاقة العالية يوجد تناظر بين التفاعلات الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة؛ فالقوة الكهرومغناطيسية والقوة النووية الضعيفة تبدوان مختلفتين في نظرنا عند الطاقات المنخفضة بسبب انكسار هذا التناظر. تخيل أن هناك قلمًا واقفًا على سِنِّه. حين يكون القلم في وضع رأسي فإنه يبدو على النحو ذاته من جميع الاتجاهات. لكن من شأن نسمة هواء عابرة أو مرور شاحنة قريبة أن يسبب سقوط القلم، وهنا سيقع في أي اتجاه بِنِسَب احتمالات متساوية. لكن حين يسقط، فإنه يسقط بطريقة «معينة» متخذًا اتجاهًا محددًا. وبالمثل، الفارق بين الكهرومغناطيسية وبين القوى النووية الضعيفة يمكن أن يكون وليد المصادفة؛ محض نتيجة عارضة للكيفية التي انكسر بها تناظر الطاقة العالية في العالم.

توجد التفاعلات الكهروضعيفة والتفاعلات القوية في نظرية مجمعة للتفاعلات الأساسية تسمى «النموذج القياسي». وقد حقق هذا النموذج نجاحًا مذهلًا تمثَّل في أن كل الجسيمات الرئيسية التي تنبَّأ بها تمَّ اكتشافُها بعد ذلك بالفعل، باستثناء جسيم واحد فقط. (فثمة حاجة لبوزون خاص يسمى «بوزون هيجز» من أجل تفسير الكتل في النموذج القياسي، وقد استعصى هذا الجسيم، حتى الآن، على الاكتشاف.) إلا أن هذا النموذج لا يقدم توحيدًا لكل أنواع التفاعلات الثلاثة بالطريقة عينها التي توحِّد بها

النظرية الكهروضعيفة بين التفاعلات الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة. ويأمل الفيزيائيون في نهاية المطاف أن يوحدوا الأنواع الثلاثة من القوى محل النقاش في نظرية واحدة، وسُتعرف وقتها بأنها «النظرية الموحَّدة العظمى». وثمة نظريات عديدة تتنافس على هذا اللقب، لكن ليس معروفًا بعدُ أيُّها الصحيح (هذا إن كان من بينها نظرية صحيحة من الأساس).

ثمة فكرة مرتبطة بالنظريات الموحدة، وهي «التناظر الفائق». وفق هذه الفرضية، ثمة تناظر كامن بين الفرميونات والبوزونات، وهما العائلتان اللتان تُعامَلان على نحو منفصل في النموذج القياسي. في نظريات التناظر الفائق، لكل فرميون بوزون «شريك»، والعكس بالعكس. فالكواركات لها شركاء بوزونية تسمى الكواركات الفائقة، وللنيوترينوات شركاء تسمى النيوترينوات الفائقة، وهكذا دواليك. وللفوتون، وهو من البوزونات، شريك من الفرميونات يسمى الفوتينو، أما شريك بوزون هيجز فيسمى الهيجزينو، وهكذا دواليك. ومن الاحتمالات المثيرة للاهتمام في التناظر الفائق أنه قد يكون هناك جسيمٌ واحدٌ على الأقل مستقرٌّ من الأعداد الضخمة للجسيمات المتوقع أن تظهر عند مستويات الطاقة العالية للغاية. أيمكن لأحد هذه الجسيمات أن يؤلف المادة المظلمة التي يبدو أنها تتغلغل في أرجاء الكون بأسره؟

## التخليق الباريوني

من الجلي أن فكرة التناظر تلعب دورًا مهمًّا في نظرية الجسيمات. على سبيل المثال، المعادلات التي تصف التفاعلات الكهرومغناطيسية تتسم بالتناظر حين يتعلق الأمر بالشحنة الكهربية. فإذا غيرنا كل الشحنات الموجبة إلى شحنات سالبة، والعكس، فإن معادلات ماكسويل التي تصف الكهرومغناطيسية ستظل صحيحة. بتعبير آخر، إن خيار تعيين شحنة سالبة للإلكترون وشحنة موجبة للبروتون هو خيار اعتباطي تمامًا؛ إذ كان من الممكن أن يصير الحال معكوسًا، ولن يُحدث هذا أي اختلاف في النظرية. هذا التناظر يُترجَم إلى قانون لحفظ الشحنة؛ فالشحنة الكهربية لا تفنى ولا تُستحدث من العدم. يبدو من المنطقي ألَّا يكون لكوننا أي شحنة كهربية صافية؛ فينبغي وجود مقدار من الشحنة الموجبة مماثل لمقدار الشحنة السالبة، وبذا يُتوقع أن تساوي محصلة الشحنة الصافية صفرًا. ويبدو أن هذا هو الحال بالفعل.

أيضًا يبدو أن قوانين الفيزياء تعجز عن التفرقة بين المادة والمادة المضادة. لكننا نعلم أن المادة العادية أكثر شيوعًا بكثير من المادة المضادة. وتحديدًا، نحن نعلم أن عدد الباريونات (البروتونات والنيوترونات) يفوق عدد الباريونات المضادة. في حقيقة الأمر تحمل الباريونات نوعًا إضافيًّا من «الشحنة» يسمى العدد الباريوني. للكون رقم باريون صافٍ. ومثلما هو الحال بالنسبة إلى الشحنة الكهربية، قد يتوقع المرء أنه ينبغي أن يكون العدد الباريوني كمية محفوظة. ومن ثم إذا لم يكن العدد الباريوني يساوي صفرًا الآن، يبدو أنه لا مناص من أن نَخْلُص إلى أنه لم يكن يحمل القيمة صفرًا قط في أي وقت من الماضي. وقد حيرت مشكلة توليد عدم التناظر هذا — مشكلة التخلق الباريوني — العلماء العاملين على نظرية الانفجار العظيم لوقت ليس بقليل.

كان الفيزيائي الروسي أندريه ساخاروف أول مَن حدد (عام ١٩٦٧) الظروف التي في ظلها يمكن أن يكون هناك بالفعل انعدام تناظر باريوني صافٍ، وأول مَن بيَّن أن العدد الباريوني لا يلزم، في واقع الأمر، أن يكون كمية محفوظة. وقد تمكن من أن يُنتج تفسيرًا وَفْقَهُ تكون قوانين الفيزياء بالفعل متناظرة باريونيًّا، وفي الأوقات المبكرة من عمر الكون لم يكن للكون رقم باريون صافٍ، لكن مع برودته ظهر تفضيل تدريجي للباريونات على الباريونات المضادة. كانت أعماله سابقة لعصرها؛ لأنها أُجريتْ قبل بناء أي نظرية موحدة لفيزياء الجسيمات بوقت طويل. وقد تمكن من اقتراح آلية يمكنها إنتاج موقف في الكون المبكر يكون فيه مقابل كل مليار باريون مضاد مليار وواحد باريون. وحين تتصادم الباريونات والباريونات المضادة، فإنها تفنى في لفحة من الإشعاع الكهرومغناطيسي. وفي نموذج سخاروف، من شأن أغلب الباريونات أن تقابل باريونات مضادة، وأن تفنى بهذه الصورة. وفي النهاية سيتبقى لدينا كون يحتوي آلافَ الملايين من الفوتونات مقابل كل باريون ناجٍ. وهذا هو واقع الحال في الكون بالفعل؛ إذ يحوي إشعاع الخلفية الميكروني الكوني مليارات الفوتونات مقابل كل باريون. وتفسير هذا الأمر يُعَدُّ مثالًا سارًّا على الارتباط بين فيزياء الجسيمات وعلم الكونيات، بَيْدَ أنه ليس أشد هذه الأمثلة إثارة على الإطلاق. وفي الفصل التالي سأناقش فكرة التضخم الكوني التي وفقًا لها يُعتقد أن الفيزياء دون الذَّرية تؤثر في هندسة الكون بأسره.

الفصل السادس

# الكون والمادة

هل الكون محدود أم غير محدود؟ هل سينتهي الانفجار العظيم بانسحاق عظيم؟ هل المكان منحنٍ حقًّا؟ كم مقدار المادة الموجودة في الكون؟ وما الشكل الذي تتخذه هذه المادة؟ من المؤكد أن المرء يتمنى أن تمدنا الدراسة الناجحة للكون بإجابة أسئلة أساسية كهذه. وهذه الإجابة تعتمد على نحو جوهري على رقم يُعرف باسم أوميجا ورمزه $\Omega$. لطالما عانى العلماء من مشكلة صعوبة قياس $\Omega$ باستخدام المشاهدات الكونية من حولنا، ولم يحققوا في هذا إلا نجاحًا محدودًا. والتقدم الكبير الحادث الآن في تطوير وتطبيق التكنولوجيات الجديدة يقترح إمكانية تحديد قيمة $\Omega$ بدقة في غضون السنوات القليلة القادمة. لكن الأمر ليس بهذه البساطة؛ إذ إن أحدث المشاهدات توحي بأن قيمة $\Omega$ قد لا تحمل في نهاية المطاف كل الأجوبة. إلا أن قضية $\Omega$ ليست مبنية بالكامل على المشاهدات؛ لأن القيمة الدقيقة التي تمتلكها هذه الكمية تحمل أدلة مهمة بشأن المراحل المبكرة للغاية من الانفجار العظيم، وبشأن بنية الكون على النطاق الواسع للغاية. لماذا إذن $\Omega$ بهذه الأهمية، ولماذا يصعب تحديد قيمتها إلى هذه الدرجة؟

## البحث عن أوميجا

لفهم دور $\Omega$ في علم الكونيات، من المهم أولًا أن نتذكر الكيفية التي رَبطتْ بها نظرية النسبية لأينشتاين بين الخواص الهندسية للزمكان (على غرار الانحناء والتمدد) وبين الخصائص الفيزيائية للمادة (على غرار الكثافة وحالة الحركة). وكما شرحتُ في الفصل الثالث فإن تطبيق هذه النظرية في علم الكونيات يوضحه على نحو مبسط استحداث «المبدأ الكوني». وفي نهاية المطاف، فإن تطور الكون بأسره محكوم بمعادلة واحدة بسيطة، تُعرف الآن باسم معادلة فريدمان.

يمكن التفكير في معادلة فريدمان بوصفها تعبيرًا عن قانون حفظ الطاقة على مستوى الكون ككلٍّ. والطاقة لها العديد من الصور المختلفة في الطبيعة، لكنه في سياقنا هذا ثمة نوعان فقط من الطاقة هما المَعْنِيَّان. يحمل الجسم المتحرك، كالرصاصة مثلًا، نوعًا من الطاقة يسمى «طاقة الحركة»، وهي تعتمد على كتلته وسرعته. من الجلي أنه بما أن الكون آخِذ في التمدد، فإن كل المجرات آخذة في التباعد بعضها عن بعضٍ؛ ومن ثم يحتوي الكون مقدارًا كبيرًا من طاقة الحركة. الصورة الأخرى من الطاقة هي «طاقة الوضع»، وهي أصعب قليلًا في فهمها. فكلما تحرك جسم ما وتفاعل عن طريق نوع ما من القوة، كان بإمكانه أن يكتسب طاقة الوضع أو يفقدها. على سبيل المثال، تخيل أن هناك ثقلًا معلقًا بطرف قطعة خيط متدلية. يصنع هذا بندولًا بسيطًا. إذا رفعت الثقل، فإنه سيكتسب طاقة وضع؛ لأنك بهذا تقاوم الجاذبية كي ترفعه. وإذا أطلقتَ الثقل فسيبدأ البندول في التأرجح. عندئذٍ سيكتسب الثقل طاقة حركة، ومع سقوطه سيفقد طاقة الوضع التي يمتلكها. تنتقل الطاقة بين النوعين في هذه العملية، لكن الطاقة الإجمالية تظل محفوظة. وسيتأرجح الثقل نحو النقطة السفلية من قوسه؛ حيث لا يمتلك أي طاقة وضع، لكنه سيظل يتحرك. وفي الواقع سيرسم الثقل دائرة كاملة، بحيث يعود في النهاية إلى النقطة العليا من قوسه، التي عندها يتوقف (لحظيًّا) قبل أن يبدأ دورة جديدة من التأرجح. وفي النقطة العليا، لا يملك الثقل طاقة حركة، بل يملك طاقة وضع تكون في أقصى درجاتها. وأيًّا كان موضع الثقل، تظل طاقة المنظومة كلها ثابتة. وهذا هو قانون حفظ الطاقة.

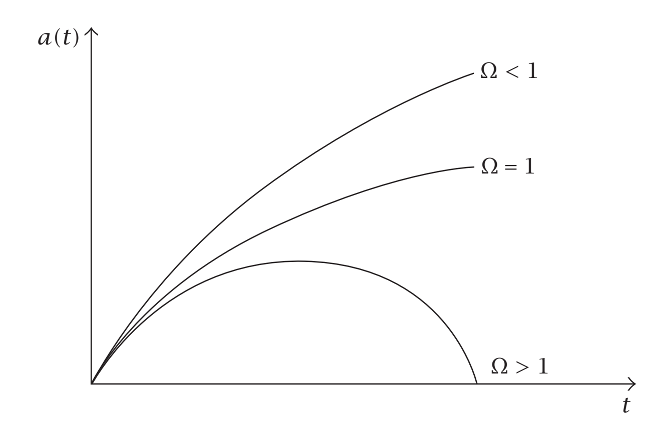
في السياق الكوني، تعتمد طاقة الحركة — على نحو بالغ — على معدل التمدد؛ أي على ثابت هابل. وتعتمد طاقة الوضع على كثافة الكون؛ أي على مقدار المادة الموجود في كل وحدة حجم للكون. لكن للأسف هذه الكمية غير معروفة بدقة إطلاقًا؛ بل هي في الواقع مشكوك فيها أكثر من ثابت هابل. لكن إذا عرفنا متوسط كثافة المادة وقيمة ثابت هابل، فسيمكننا حساب طاقة الكون الإجمالية. ويجب أن تكون هذه الطاقة ثابتة مع مرور الزمن، بما يتوافق مع قانون حفظ الطاقة (أو في هذا السياق، معادلة فريدمان).

وبتنحية الصعوبات الفنية الناجمة عن تدخل النسبية العامة جانبًا، يمكننا الآن أن نناقش تطور الكون على نحو إجمالي مستخدمين أمثلة مألوفة مأخوذة من فيزياء المرحلة الثانوية. على سبيل المثال، تدبَّر مشكلة إطلاق مركبة من الأرض إلى الفضاء. في هذه الحالة تكون الكتلة المسئولة عن طاقة الوضع الجذبية للمركبة هي كوكب الأرض.

وتتحدد طاقة الحركة الخاصة بالمركبة بواسطة قوة الصاروخ المستخدم. فإذا زودنا المركبة بصاروخ متواضع وحسب، بحيث لا يتحرك بسرعة كبيرة عند الإطلاق، فستكون طاقة الحركة صغيرة، وقد لا تكفي لجعل الصاروخ يُفلِت من جاذبية الأرض. وبهذا يرتفع الصاروخ قليلًا ثم يهبط مجددًا. من منظور الطاقة، ما حدث هو أن الصاروخ استنفد طاقة الحركة التي يملكها، والتي استُهلكتْ بثمن باهظ عند الإطلاق، ثم دفع الثمن على صورة طاقة وضع كبيرة تتناسب مع ارتفاعه المتزايد. وإذا استخدمنا صاروخًا أكبر، فسيعلو إلى ارتفاع أكبر قبل أن يهوي مجددًا إلى الأرض. وفي النهاية سنعثر على صاروخ كبير بما يكفي بحيث يمد المركبة بالطاقة الكافية؛ كي تفلت تمامًا من قبضة مجال الجاذبية الأرضية. وعادةً ما يُطلق على سرعة الإطلاق الحرجة في هذه الحالة اسم «سرعة الإفلات»؛ وإذا زادت سرعة الصاروخ عن سرعة الإفلات فسيواصل حركته إلى الأبد، وإذا قلَّتْ عنها فسيهوي إلى الأرض.

في السياق الفلكي الصورة مشابهة، لكن الكمية الحرجة ليست سرعة الصاروخ (المشابهة لثابت هابل، ومن ثم تكون معروفة، على الأقل من حيث المبدأ)، وإنما كتلة كوكب الأرض (أو في حالة الكون ككلٍّ، كثافة المادة). ومن ثم يكون من المفيد للغاية التفكير في الكثافة الحرجة للمادة، عوضًا عن السرعة الحرجة. فإذا تجاوزت الكثافة الفعلية للمادة الكثافة الحرجة، فسينهار الكون في نهاية المطاف على ذاته؛ إذ ستكون طاقة الجاذبية الخاصة به كافية لأن تبطئ التمدد ثم توقفه، وفي النهاية تعكس مساره إلى أن ينهار الكون على نفسه. وإذا كانت الكثافة أقل من القيمة الحرجة، فسيواصل الكون تمدده إلى الأبد. يتضح أن الكثافة الحرجة صغيرة للغاية، وهي أيضًا تعتمد على ثابت هابل، لكن في نطاق ذرة هيدروجين واحدة لكل متر مكعب. وأغلب الفيزيائيين التجريبيين سيَعُدُّون المادة التي لها مثل هذا المقدار المنخفض من الكثافة مثالًا جيدًا للغاية على الفراغ!

الآن، على الأقل، يمكننا تقديم القيمة أوميجا $\Omega$؛ فهي ببساطة نسبة الكثافة الفعلية للمادة في الكون إلى القيمة الحرجة التي تمثل الحدَّ الفاصل بين التمدد السرمدي والانهيار الحتمي. تمثل القيمة $\Omega = 1$ الحد الفاصل، وإذا كانت $\Omega < 1$ فهذا يعني تمدد الكون بلا نهاية، أما القيمة $\Omega > 1$ فتشير إلى انهيار الكون على ذاته في انسحاق عظيم. وبغضِّ النظر عن القيمة الدقيقة لأوميجا، فإن تأثير المادة دائمًا هو إبطاء تمدد الكون، ومن ثم تتنبأ هذه النماذج دائمًا بإبطاء تمدد الكون، لكن سيأتي المزيد عن هذا لاحقًا.




شكل ٦-١: نماذج فريدمان. بالإضافة إلى امتلاكها خيارات عديدة بشأن المكان المنحني، تستطيع نماذج فريدمان أيضًا أن تسير على نحو مختلف مع تطورها عبر الزمن. إذا كانت قيمة $\Omega$ أكبر من واحد فسيتوقف التمدد في نهاية المطاف وينهار الكون على نفسه. أما إذا كانت أقل من واحد، فسيتمدد الكون إلى الأبد. وبين هاتين القيمتين يوجد نموذج الكون المنبسط الذي تكون فيه قيمة $\Omega$ مضبوطة تمامًا بحيث تساوي واحدًا صحيحًا.

لكن الاستمرارية طويلة المدى للتمدد الكوني ليست هي القضية الوحيدة التي يعتمد حلها على قيمة $\Omega$؛ فهذه الحجج المبنية على أفكار الطاقة البسيطة الناتجة عن فيزياء نيوتن ليست القصةَ كلها. ففي نظرية النسبية العامة لأينشتاين، يحدد إجمالي الطاقة–الكثافة الانحناءَ العام للمكان، كما أوضحتُ في الفصل الثالث. ينتج المكان ذو الانحناء السالب في النماذج التي تقل فيها قيمة $\Omega$ عن واحد، ويُوصف أي نموذج ذي انحناء سالب بأنه نموذج لكون مفتوح. بينما يظهر النموذج ذو الانحناء الموجب (الكون المغلق) إذا زادت قيمة $\Omega$ عن الواحد. وفيما بين الاثنين، يوجد النموذج الكلاسيكي الوسيط الذي فيه تساوي قيمة $\Omega$ الواحد الصحيح تمامًا، ولهذا النموذج هندسة منبسطة تنطبق فيها قوانين إقليدس. كم سنشعر بالراحة لو اكتشفنا أن الكون اختار أبسط هذه الخيارات!

إن الكمية $\Omega$ تحدد كلًّا من هندسة المكان على المستويات الكونية، والمصير النهائي للكون كذلك، بَيْدَ أنه من المهم أن نشدد على أن قيمة $\Omega$ لا يتنبأ بها نموذج الانفجار

العظيم على الإطلاق. قد تبدو النظرية التي تفشل في الإجابة عن الأسئلة الأساسية التي تدور حول $\Omega$ وكأنها نظرية عديمة القيمة إلى حدٍّ بعيد، لكن هذا النقد في الواقع ليس منصفًا. فكما أوضحتُ من قبل فإن الانفجار العظيم «نموذج»، وليس نظرية كاملة. وبوصفه نموذجًا فهو يتسم بالاتساق رياضيًّا أو عند مقارنته بالمشاهدات، بَيْدَ أنه ليس تامًّا. وفي هذا السياق يعني هذا أن $\Omega$ متغير «حر» شأنها شأن ثابت هابل. بتعبير آخر: المعادلات الرياضية الخاصة بنظرية الانفجار العظيم تصف تطور الكون، لكن من أجل أن نحسب مثالًا محددًا نحتاج إلى توفير مجموعة من الظروف المبدئية كي تكون نقطة انطلاق لنا. وبما أن الأسس الرياضية التي ينبني عليها النموذج تنهار عند بدايات الكون المبكرة، فليس لدينا وسيلة لتثبيت الظروف المبدئية على نحو نظري. إن نظرية فريدمان محددة بدرجة جيدة، بغض النظر عن قيم أوميجا وثابت هابل، وكل ما في الأمر أن كوننا تصادف أنه بُني وفق توليفة عددية معينة من هذه الكميات. ومن ثم فإن كل ما يسعنا فعله هو استخدام البيانات الرصدية للخروج باستنتاجات بشأن المتغيرات الكونية؛ إذ إن هذه المتغيرات يستحيل، على الأقل في ضوء المعارف الحالية وداخل الإطار القياسي للانفجار العظيم، أن تُستنتَج عن طريق التفكير المنطقي وحده. وعلى الجانب الآخر، ثمة فرصة لاستخدام المشاهدات الكونية الحالية؛ كي نعرف أحوال الكون في مراحله المبكرة للغاية.

## البحث عن رقمين

أُدرِكتْ أهمية تحديد المتغيرات الكونية في وقت مبكر من تاريخ علم الكونيات. وفي الواقع، كتب الفلكي البارز آلان سانديج (الذي أجرى دراساته البحثية العليا تحت إشراف هابل) ذات مرة ورقة بحثية بعنوان «علم الكونيات: البحث عن رقمين». وبعدها بعقدين، ما زلنا نجهل قيمة هذين الرقمين، ولفهم السبب وراء ذلك علينا أن نفهم الأنواع المختلفة للمشاهدات التي يمكنها أن تعرِّفنا بقيمة $\Omega$، ونوعية النتائج التي أنتجتها. فهناك أنواع مختلفة من المشاهدات، لكن من الممكن تجميعها في أربع فئات رئيسة.

أولًا: هناك الاختبارات الكلاسيكية المَعْنِية بدراسة الكون. وفكرة هذه الاختبارات هي استخدام المشاهدات الخاصة بكل جِرم بعيد؛ من أجل قياس انحناء المكان، أو المعدل الذي يتباطأ به تمدُّد الكون. وأبسط هذه الاختبارات يتضمن مقارنة أعمار الأجرام السماوية (وخاصة النجوم الموجودة في منظومات العناقيد الكروية) بالعمر الذي تتنبأ

به النظرية الكونية. ناقشتُ هذا الأمر في الفصل الرابع؛ لأنه إذا لم يكن تمدد الكون آخذًا في التباطؤ؛ فإن العمر المُتنبَّأ به يعتمد بدرجة وثيقة على ثابت هابل أكثر مما يعتمد على قيمة Ω، وعلى أي حال فإن أعمار النجوم القديمة ليست معروفة بأي درجة كبيرة من الثقة؛ لذا لا يفيد هذا الاختبار كثيرًا في تحديد قيمة Ω في الوقت الحاضر. تتضمن الاختبارات الكلاسيكية الأخرى خصائص المصادر البعيدة للغاية؛ كي نتحقق على نحو مباشر من معدل التباطؤ أو الهندسة المكانية للكون. بعض هذه الأساليب كان هابل هو رائدها، بينما نقَّحها سانديج ببراعة. بَيْدَ أنها لم تكن محل تفضيل في ستينيات القرن العشرين وسبعينياته؛ لأنه في ذلك الوقت لم يكن معروفًا أن الكون إجمالًا يتمدد وحسب، بل إن الأجرام الموجودة داخله آخذة في التطور بسرعة. وبما أنه على المرء أن يستكشف مسافات بعيدة للغاية من أجل قياس التأثيرات الهندسية الطفيفة للغاية لانحناء المكان، فإنه في واقع الأمر ينظر لا محالة إلى الأجرام السماوية كما كانت حين غادرها الضوء في رحلته نحونا. ومن الممكن أن يكون هذا الوقت كبيرًا للغاية؛ يصل في المعتاد إلى أكثرَ مِن ثمانين بالمائة من عمر الكون في المشاهدات الكونية. فلا يوجد ما يضمن أن يكون سطوع الأجرام البعيدة المستخدمة أو أحجامها لهما الخصائص عينها التي للنجوم القريبة؛ وذلك بسبب إمكانية أن تكون هذه الخصائص قد تغيرت مع مرور الزمن. في واقع الأمر، تُستخدم الاختبارات الكونية الكلاسيكية في الوقت الحاضر بالأساس بهدف دراسة تطور الخصائص، لا اختبارِ المناحي الرئيسة لعلم الكونيات. ومع ذلك ثمة استثناء حديث مهم؛ إذ أسفر استخدام انفجارات المستعرات العظمى (السوبرنوفا) بوصفها مصادر ضوئية قياسية عن نتائج رائعة تقترح فيما يبدو أن الكون لا يتباطأ في التمدد على الإطلاق. وسأتحدث بمزيد من التفصيل عن هذا الأمر في نهاية هذا الفصل.

بعد ذلك هناك الحجج المبنية على نظرية التخليق النووي. وكما أوضحتُ في الفصل الخامس؛ يُعَدُّ الاتفاق بين الوفرة المرصودة للعناصر من جهة، وبين التنبؤات الخاصة بحسابات الاندماج النووي في المراحل المبكرة من عمر الكون من جهة أخرى؛ أحدَ ركائز الأدلة الأساسية الداعمة لنظرية الانفجار العظيم. بَيْدَ أن هذا الاتفاق لا يسري إلا إذا كانت كثافة المادة قليلة للغاية؛ أي لا تزيد عن نسبة مئوية ضئيلة من الكتلة الحرجة المطلوبة كي يكون المكان منبسطًا. كان هذا معروفًا لسنوات عدة، ومن الوهلة الأولى يبدو أنه يقدم إجابة بسيطة للغاية لكل الأسئلة التي طرحْتُها. ومع ذلك، هناك شرط بسيط مقيِّد؛ إذ إن حدَّ «النسبة المئوية الضئيلة» ينطبق فقط على المادة التي يمكنها المشاركة في التفاعلات

النووية. فربما كان الكون مليئًا بخلفية من الجسيمات الخاملة العاجزة عن التأثير في عملية تخليق العناصر الخفيفة. يسمى نوع المادة الذي يشارك في التفاعلات النووية باسم المادة «الباريونية»، وهو يتألف من جسيمين أساسيين؛ البروتونات والنيوترونات. وقد اقترح فيزيائيو الجسيمات أنه ربما أُنتجت أنواع أخرى غير باريونية من المادة داخل الأتون المتَّقِد للكون المبكر. وعلى الأقل بعضٌ من هذه الجسيمات ربما ظل باقيًا إلى الآن، وربما يؤلف ولو جزءًا من المادة المظلمة. ومن ثم ربما يتضمن بعضٌ من المادة المكونة للكون نوعًا ما من الجسيمات العجيبة غير الباريونية. وقد لا تكون المادة العادية — التي نتكون منها — أكثر من لطخة صغيرة على ثوب المادة الكونية الشاسعة التي لم تتحدد طبيعتها بعد. وهذا يضيف بُعدًا آخر إلى المبدأ الكوبرنيكي؛ فنحن لم نعد في مركز الكون وحسب، بل إننا حتى لا نتكون من المادة عينها التي يتكون منها السواد الأعظم من الكون.

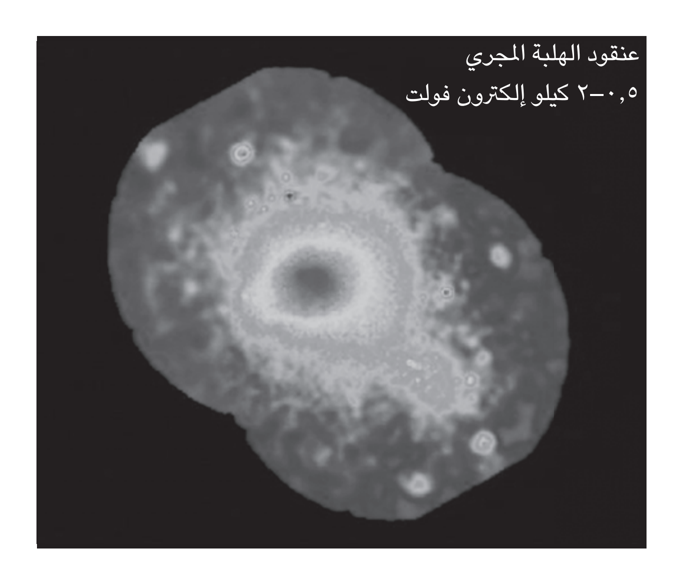
الفئة الثالثة من الأدلة مبنية على حجج فيزيائية فلكية. والفارق بين هذه الحجج وبين القياسات الكونية في جوهرها، التي ناقشناها سابقًا، هو أنها تنظر إلى الأجرام المنفردة بدلًا من خصائص المكان الفاصل بينها. ففي الواقع، نحن نحاول هنا أن نحدد كثافة الكون عن طريق وزن العناصر المكونة له واحدًا تلو الآخر. على سبيل المثال، يمكننا أن نحاول استخدام آليات الحركة الداخلية للمجرات من أجل حساب كتلتها، وذلك بافتراض أن الجاذبية تحافظ على دوران القرص المجرِّيِّ بالطريقة عينها تقريبًا التي تهيمن بها جاذبية الشمس على حركة كوكب الأرض حول الشمس. فمن الممكن حساب كتلة الشمس من واقع سرعة كوكب الأرض في مداره، ومن الممكن إجراء عملية حسابية مشابهة من أجل المجرات؛ إذ إن السرعات المدارية للنجوم داخل المجرات تتحدد بواسطة الكتلة الإجمالية للمجرة التي تمارِس على النجوم قوة جذب. ومن الممكن بسط المبدأ عينه ليشمل العناقيد المجرية، بل والمنظومات الأكبر حجمًا من هذا. وتشير هذه العمليات البحثية على نحو مقنع للغاية إلى احتواء المجرات على مادة أكثر بكثير من تلك التي نراها بأعيننا على صورة نجوم كشمسنا. وهذه هي المادة المظلمة الشهيرة التي لا يمكننا أن نراها، وإنما يمكننا الاستدلال على وجودها من واقع تأثيرها الجذبي.

العناقيد المجرِّية الثرية — تلك المنظومات البالغ قطرها أكثر من مليون سنة ضوئية، وتتكون من تجميعات هائلة من المجرات — تحتوي أيضًا قدرًا من المادة أكبرَ مما يُعزى إلى المجرات المنفردة الموجودة داخلها. إن مقدار المادة المحدد غير واضح، لكن



شكل ٦-٢: عنقود الهلبة المجرِّي. هذا مثال للعناقيد المجرية الثرية. وباستثناء النجوم المنفردة (كتلك الواقعة في يمين الصورة) فإن جميع الأجرام في هذه الصورة هي جميعها مجرات يحتويها عنقود مجري عملاق. العناقيد المجرية الضخمة كهذا نادرة نسبيًّا، لكنها تحتوي على مقدار ضخم للغاية من الكتلة، تصل إلى ١٠٠ مليون مليون مرة قدر كتلة الشمس.

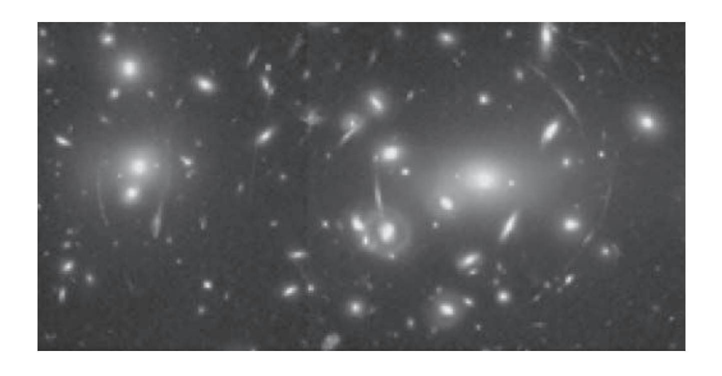
ثمة أدلة قوية للغاية على أنه يوجد ما يكفي من المادة داخل المنظومات العنقودية الغنية بما يقترح أن قيمة أوميجا تصل إلى ٠٫١، بل وربما تزيد عن ٠٫٣. بل وتوحي أدلة غير حاسمة آتية من آليات حركة البِنَى الأكبر — العناقيد المجرية الفائقة التي يصل حجمها إلى عشرات ملايين السنوات الضوئية — بأن المزيد من المادة المظلمة يكمن في الفضاء الواقع بين العناقيد المجرية. هذه الحجج القائمة على آليات الحركة اختُبرت هي الأخرى حديثًا، وتأكَّدت من واقع مشاهدات مستقلة لتأثير عدسة الجاذبية الذي تتسبب فيه العناقيد المجرية، ومن واقع قياسات خصائص الغاز الحار للغاية المُطلِق للأشعة السينية التي يتخللها. ومن المثير للاهتمام أن نسبة المادة الباريونية داخل العناقيد المجرية مقارنةً بكتلتها الإجمالية تبدو أكبر بكثير من القيمة العامة التي تسمح بها




شكل ٦ -٣: عنقود الهلبة المجرِّي بالأشعة السينية. بالإضافة إلى المئات العديدة من المجرات التي تظهر في الصورة السابقة، تحتوي العناقيد المجرية كعنقود الهلبة على غاز حار للغاية يمكن تبيُّنه من خلال الإشعاع السيني الذي يطلقه. هذه الصورة التُقطتْ بواسطة القمر الصناعي «روسات».

عملية التخليق النووي لو أن هناك كثافة حرجة للمادة إجمالًا. تعني هذه الظاهرة المسماة «الكارثة الباريونية» أنه إما أن الكثافة الإجمالية للمادة أقل كثيرًا من القيمة الحرجة أو أن ثمة عملية مجهولة ما ربما أدت إلى تركيز المادة الباريونية في عناقيد.

أخيرًا، لدينا خيوط قائمة على محاولات فهم أصل البنية الكونية؛ أي الكيفية التي صار بها الكون على ما هو عليه من تكتُّل وعدم انتظام في ظل الاتساق والتجانس العام اللذين يفرضهما المبدأ الكوني. في الفصل التالي سأناقش بمزيد من التفصيل الفكرة الكامنة وراء الكيفية التي يُعتَقَد أن هذا حدث بها في نموذج الانفجار العظيم. في رأيي، المبادئ الأساسية مفهومة على نحو طيب نسبيًّا، أما التفاصيل فهي معقدة للغاية وعُرضة لكل أنواع عدم اليقين والتحيز. ولقد صِيغَتْ نماذجُ، ويمكن أن تُصاغ نماذج أخرى، يبدو أنها تتلاءم مع كل البيانات المتاحة، وفيها تقترب قيمة Ω للغاية من الواحد الصحيح.



شكل ٦-٤: عدسة الجاذبية. يمكن قياس أوزان العناقيد الثرية عن طريق رصد التشوهات التي تصيب الضوء الصادر من المجرات الموجودة في الخلفية بينما يمر عبر العنقود المجري. في هذا المثال الجميل للعنقود المجري «أبيل ٢٢١٨» نرى الضوء القادم من الخلفية، وقد تركز في نمط معقَّد من الأقواس بينما يعمل العنقود المجري كعدسة عملاقة. هذه الملامح تكشف عن مقدار الكتلة الذي يحتويه العنقود المجري.

لكن صِيغَت نماذج أخرى تحمل فيها $\Omega$ قيمة تقل كثيرًا عن هذا الرقم. وقد يبدو هذا أمرًا محبطًا، لكن من المرجح أن ييسر هذا النوع من الدراسات الطريق نحو التحديد الناجح لقيمة $\Omega$. وإذا أمكن عمل المزيد من القياسات التفصيلية للملامح الظاهرة على إشعاع الخلفية الميكروني، فستخبرنا خصائص هذه الملامح على الفور بما يجب أن تكون عليه كثافة المادة. وكمكافأة إضافية، سوف تحدد أيضًا ثابت هابل، متجاوِزة كل العمل المُمِل الخاص بسُلم المسافات الكوني. ونأمُل فقط أن تتمكن الأقمار الصناعية المخطط لها أن تقوم بذلك — وهي «مسبار قياس تباين الأشعة الكونية» و«مرصد بلانك الفضائي» — من الانطلاق بنجاح في السنوات القليلة القادمة. وقد بيَّنتْ تجارب المناطيد الحديثة أن هذا يبدو أمرًا قابلًا للتحقيق، وسأناقشه بالتفصيل في الفصل السابع.

يمكننا تلخيص حالة الأدلة بأن نقترح أن الأغلبية العظمى من علماء الكونيات يتقبلون على الأرجح أن قيمة $\Omega$ لا يمكن أن تقل عن ٠٫٢، وحتى هذه القيمة الضئيلة تتطلب أن تكون أغلب المادة الموجودة في الكون مادةً مظلمة. وهذا يعني أيضًا أن بعض المادة على الأقل يجب أن يكون في صورة بروتونات ونيوترونات (باريونات)، يكمن فيها السواد الأعظم من كتلة المادة المألوفة لدينا في خبرتنا اليومية. بعبارة أخرى، لا بد من

وجود مادة مظلمة غير باريونية. أغلب علماء الكونيات يرون أن قيمة Ω تبلغ ٠٫٣، وهو ما يبدو متسقًا مع معظم الأدلة الرصدية. وقد زعم البعض أن الأدلة تؤيد أن قيمة الكثافة تقترب من القيمة الحرجة؛ ومن ثم من الممكن أن تكون قيمة Ω مقاربة للغاية من الواحد الصحيح. ويرجع هذا في جزء منه إلى تراكم الأدلة الفلكية المؤيدة لوجود المادة المظلمة، ويرجع أيضًا إلى أن الإدراك النظري بأن المادة غير الباريونية ربما أُنتجت في الطاقات العالية للغاية للانفجار العظيم.

## الحبل الكوني المشدود

إن الجدل الكبير نسبيًّا حول قيمة Ω يتسبب فيه جزئيًّا حالات الخلاف الناجمة عن صعوبة تقييم مدى موثوقية ودقة الأدلة الرصدية (المتعارضة أحيانًا). وأقوى الحجج المؤيدة لأن تكون لـ Ω قيمة عالية (أي تقارب الواحد الصحيح) مبنية على حجج نظرية، لا رصديةٍ. وقد يميل المرء إلى رفض مثل هذه الحجج بوصفها محض تحيزات، بَيْدَ أنها تضرب بجذورها في ذلك اللغز العميق الكامن في نظرية الانفجار العظيم، ذلك اللغز الذي يأخذه علماء الكونيات على محمل الجِدِّ الشديد.

ولفهم طبيعة هذا اللغز، تخيل أنك تقف خارج حجرة مغلقة بإحكام. إن محتويات الحجرة محجوبة عنك، خلا نافذة صغيرة. يقال لك إنك تستطيع فتح النافذة في أي وقت تشاء، لكن لمرة واحدة فقط، ولفترة وجيزة من الوقت. ويقال لك إن الحجرة خالية، عدا حبل مشدود معلق في منتصفها على ارتفاع نحو مترين عن الأرض، ورجل بدأ في وقت غير محدد من الماضي السير على الحبل المشدود. أنت تعلم أيضًا أنه إذا وقع الرجل، فإنه سيظل على الأرض إلى أن تفتح النافذة. وإذا لم يقع، فسيواصل السير على الحبل المشدود إلى أن تراه.

ما الذي تتوقع رؤيته عندما تفتح النافذة؟ إنَّ توقُّعَكَ أن تجد الرجل على الحبل أو على الأرض يعتمد على معلومات ليست بحوزتك. فإذا كان هذا الرجل لاعب سيرك، فسيكون قادرًا على المشي جيئة وذهابًا على الحبل لساعات دون أن يسقط. من ناحية أخرى، إذا لم يكن الرجل متخصصًا في هذا المجال (شأنه في ذلك شأن أغلبنا) فلن يطول وقت بقائه على الحبل. ومع ذلك ثمة شيء بديهي؛ وهو أنه إذا وقع الرجل، فسيستغرق وقتًا وجيزًا للغاية في السقوط من الحبل إلى الأرض. ومن ثم ستندهش للغاية إذا اختلستَ النظر من النافذة وتصادف أنك رأيتَه وهو يقع من الحبل إلى الأرض. فمن المنطقي، على

أساس ما نعرفه من معلومات عن الموقف، أن نتوقع أن يكون الرجل إما على الحبل أو على الأرض حين ننظر، لكن إذا نظرتَ ووجدته في منتصف السقوط، فستخلص إلى أن ثمة ما يريب في الأمر.

قد لا يبدو هذا المثال وثيق الصلة بقيمة Ω، لكن وجه الشبه سيصير واضحًا حين ندرك أن Ω ليست لها قيمة ثابتة مع مرور الزمن. ففي نماذج فريدمان القياسية، تتطور Ω، وهذا يحدث بطريقة غريبة للغاية. ففي أوقات قريبة غير محددة من الانفجار العظيم، تُوصَف هذه النماذج كلها بواسطة قيمة Ω قريبة اعتباطيًّا من الواحد الصحيح. بتعبير آخر، إذا نظرت إلى الشكل (٦-١) فستجد أنه بغض النظر عن شكل المنحنيات الثلاثة في الأوقات اللاحقة، فإنها جميعًا تقترب أكثر وأكثر بعضها من بعض قرب البداية، وتحديدًا تقترب كلها من خط «الكون المنبسط». ومع مرور الوقت، فإن النماذج التي فيها قيمة Ω تزيد قليلًا عن الواحد الصحيح في المراحل المبكرة تكتسب قيمًا أكبر وأكبر لـ Ω، بحيث تزيد القيم كثيرًا عن الواحد الصحيح حين تنهار مجددًا على نفسها. والأكوان التي تبدأ بقيم لـ Ω أقل من الواحد الصحيح تتمدد في نهاية المطاف أسرع بكثير عن النموذج المنبسط، ثم تكون لها قيم Ω تقترب للغاية من الصفر. في الحالة الأخيرة، وهي الأقرب من واقعنا في ضوء المؤشرات العديدة التي تقضي بأن قيمة Ω تقل عن الواحد الصحيح، فإن الانتقال من قيمة Ω مقاربة للواحد الصحيح إلى قيمة Ω مقاربة للصفر يكون انتقالًا سريعًا للغاية.

الآن يمكننا أن نرى المشكلة. فإذا كانت قيمة Ω تبلغ، مثلًا ٠٫٣، إذن فهي كانت في المراحل المبكرة للغاية من تاريخ الكون تقترب كثيرًا من الواحد الصحيح، لكنها أقل من تلك القيمة بمقدار ضئيل. في الواقع، هو مقدار ضئيل للغاية حقًّا. فعند زمن بلانك على سبيل المثال (أي بعد $١٠^{-٤٣}$ ثانية من الانفجار العظيم) كان لا بد أن يكون الفارق بين قيمة Ω وبين الواحد الصحيح فارقًا ضئيلًا يقع عند العلامة العشرية الستين. ومع مرور الوقت، اقتربت Ω ببطء من حالة الكثافة الحرجة، ولم تبدأ في التحرك بسرعة إلا في الماضي القريب. وفي المستقبل القريب للغاية ستقترب بشدة من الصفر. لكن في الوقت الحالي، يبدو الأمر وكأننا لمحنا الرجل الذي يمشي على الحبل وهو في منتصف السقوط تمامًا. وأقل ما يوصف به هذا الأمر هو أنه يبدو باعثًا على الدهشة.

صارت هذه المفارقة تُعرف باسم «مشكلة الانبساط الكوني»، وهي نابعة من عدم اكتمال نظرية الانفجار العظيم القياسية. وقد تسبب كِبَر حجم المشكلة في جعل العديد

من العلماء يقتنعون بأنها تحتاج إلى حلٍّ كبير. وبدا أن السبيل الوحيد لحل هذه المعضلة هو أن يكون كوننا بالفعل مؤدِّيَ سيركٍ محترفًا، وهذا إذا تمادينا في التشبيه إلى حد المبالغة. من الجلي أن قيمة Ω ليست قريبة من الصفر؛ لأن لدينا أدلة قوية على أن حدها الأدنى لا يقل عن ٢٠ بالمائة. وهذا يستبعد خيار الرجل الواقع على الأرض. ومن ثم لا بد أن تكون قيمة Ω مقارِبة بشدة للواحد الصحيح، وأن شيئًا ما حدث في الأزمنة الأولى بحيث جرى اختيار هذه القيمة على نحو دقيق للغاية.

## التضخم والانبساط

يُزعَم أن الحدث الذي تسبب في هذا هو التضخم الكوني، وهو فرضيةٌ أولُ مَن طرحها آلان جوث عام ١٩٨١ بشأن المراحل المبكرة للغاية من نموذج الانفجار العظيم. ويتضمن التضخم تغيرًا عجيبًا في خصائص المادة عند الطاقات العالية للغاية يُعرف باسم «التحول الطوري».

قابلنا بالفعل مثالًا على التحول الطوري؛ إذ يحدث أحد التحولات الطورية في النموذج القياسي بعد مرور جزء على المليون من الثانية على الانفجار العظيم، وهو مرتبط بالتفاعلات بين الكواركات. فعند درجات الحرارة المنخفضة، تظل الكواركات حبيسة الهادرونات، بينما عند درجات الحرارة العالية تكوِّن الكواركات بلازما الكواركات–الجلوونات. وفيما بين الحالتين تحدث عملية تحول طوري. وفي العديد من النظريات الموحدة، من الممكن أن يكون هناك العديد من التحولات الطورية على درجات حرارة أعلى من ذلك، وكلها تمثِّل تغيرات في شكل وخصائص المادة والطاقة في الكون. وفي ظل ظروف معينة، يمكن أن يكون التحول الطوري مصحوبًا بظهور الطاقة في الفضاء الخاوي، وهذه الطاقة تسمى «طاقة الفراغ». وإذا حدث هذا، يبدأ الكون في التمدد بسرعة أكبر بكثير من تمدده وفق نماذج فريدمان. وهذا هو التضخم الكوني.

كان للتضخم تأثير عظيم في النظرية الكونية على مر العشرين عامًا الماضية. وفي هذا السياق، أهم شيء بشأنه هو أن مرحلة التمدد الجامح — التي تكون قصيرة الأمد — تقلب في واقع الأمر الكيفية التي من شأن Ω أن تتغير بها في ظروف مغايرة مع مرور الزمن؛ رأسًا على عقب. فحين يبدأ التضخم، تُدفَع قيمة Ω بقوة نحو الواحد الصحيح، بدلًا من أن تبتعد عنه كما يحدث في الحالات الموصوفة أعلاه. فالتضخم يكون أشبه بحبال التأمين التي تعيد الشخص الذي يمشي على الحبل إليه كلما بدا أنه سيسقط. ومن

الطرق اليسيرة لفهم كيفية حدوث هذا الأمر الاستعانة بالارتباط الذي أرسيتُه بالفعل بين قيمة Ω وبين انحناء المكان. تذكَّرْ أن المكان المنبسط يتوافق مع الكتلة الحرجة، ومن ثم يتوافق مع قيمة Ω التي تساوي الواحد الصحيح. وإذا اختلفت قيمة Ω عن هذه القيمة السحرية فعندئذٍ قد يكون المكان منحنيًا. وإذا أخذ المرء بالونًا شديد الانحناء ونفخه حتى يصل إلى حجم هائل — لِنَقُلْ مثلًا حجم كوكب الأرض — عندها سيبدو سطحه وكأنه منبسط. في علم كونيات التضخم، يبدأ البالون وعَرْضُه لا يتجاوز كسرًا بسيطًا من السنتيمتر، وينتهي به الحال وهو أكبر من الكون القابل للرصد. وإذا صحت نظرية التضخم، فحريٌّ بنا أن نتوقع أننا نعيش في كون منبسط للغاية بالفعل. من ناحية أخرى، حتى إذا تبيَّن أن قيمة Ω تقترب للغاية من الواحد الصحيح، فلن يُثبِت هذا بالضرورة أن التضخم وقع بالفعل. فلربما أدَّتْ آلية أخرى — قد تكون ذات صلة بظواهر الجاذبية الكمية — إلى تعليم كوننا كيف يمشي على الحبل المشدود.

هذه الأفكار النظرية مهمة للغاية، بَيْدَ أنها لا تستطيع وحدها حسم القضية. ففي نهاية المطاف، وسواء أحب المنظِّرون هذا أم لم يحبوه، علينا تقبُّل حقيقة أن علم الكونيات صار علمًا تجريبيًّا قائمًا على المشاهدات. فربما نملك أسبابًا نظرية تجعلنا نشك في أن قيمة Ω ينبغي أن تكون قريبة للغاية من الواحد الصحيح، لكن المشاهدات الفعلية هي صاحبة الكلمة العليا في نهاية المطاف.

## المفاجأة

السؤال الذي يُطِلُّ برأسه من بين كل هذا هو: إذا كانت قيمة Ω، كما يبدو مبدئيًّا، أقل بكثير من الواحد الصحيح، فهل علينا إذن التخلي عن فكرة التضخم الكوني؟ والجواب هو: «ليس بالضرورة.» فعلى سبيل المثال هناك بعض نماذج للتضخم بُنيت بحيث تنتج كونًا مفتوحًا سالب الانحناء، وإن كان الكثير من علماء الكونيات لا يحبون هذه النماذج، وتبدو في نظرهم مصطنعة. ما هو أهم من ذلك أن ثمة مؤشرات الآن على أن الارتباط بين Ω وبين هندسة المكان قد يكون أقل صراحة مما اعتُقد مسبقًا. فبعد سنوات عدة من التخبط والارتباك، بدأت الاختبارات الكونية الكلاسيكية التي ذكرتُها من قبل في العودة مجددًا على نحو قوي. وقد عكف فريقان دوليان من الفلكيين على دراسة خصائص نوع محدد من النجوم المتفجرة؛ المستعرات العظمى من النوع (١أ).

يمثل انفجار المستعر الأعظم نهاية درامية لحياة أي نجم ضخم. والمستعرات العظمى من بين أكثر الظواهر المعروفة في علم الفلك إثارة للذهول. فانفجار المستعر

الأعظم أشد سطوعًا من الشمس بمليار مرة، ويمكن أن يفوق سطوع مجرة بأكملها لأسابيع عديدة. وقد رُصدت المُستَعِرات العظمى على مر التاريخ المدَوَّن، وقد أدى مستعر أعظم رُصِد وسُجِّل عام ١٠٥٤ إلى نشوء سديم السرطان، وهو سحابة من الغبار والحطام يقع داخلها نجم يدور حول نفسه في سرعة شديدة، يُسمى نجمًا نابضًا. وقد رصد عالم الفلك الدانماركي العظيم تيكو براهي مستعرًا أعظم عام ١٥٧٢، وآخِر حدث مماثل شوهد في مجرتنا يرجع تاريخه إلى عام ١٦٠٤، وعُرف وقتها بنجم كبلر. ورغم أن المعدل المعتاد لحدوث هذه الانفجارات في مجرة درب التبانة يبدو أنه نحوُ انفجارٍ واحد أو انفجارين في القرن أو نحو ذلك، وهذا استنادًا إلى السجلات التاريخية، فإنه لم يُرصد أي انفجار على مدار نحو ٤٠٠ عام. لكن في عام ١٩٨٧ انفجر مستعر أعظم بالفعل، في سحابة ماجلان الكبرى، وكان من الممكن رؤيته بالعين المجردة.

هناك نوعان مختلفان من المستعرات العظمى، يسمَّيَان النوع ١ والنوع ٢. وتكشف قياسات التحليل الطيفي عن وجود الهيدروجين في المستعرات العظمى من النوع ٢، لكن هذا العنصر غير موجود في المستعرات العظمى من النوع ١. ويُعتقد أن المستعرات العظمى من النوع ٢ نشأت مباشرة من انفجارات النجوم الضخمة التي تنهار قلوبها على نفسها بحيث تصير أشبه بأثر ميت، بينما تُلفَظ طبقاتها الخارجية في الفضاء. والمرحلة الأخيرة لهذا الانفجار تُخَلِّف إما نجمًا نيوترونيًّا وإما ثقبًا أسود. قد تَنْتج المستعرات العظمى من النوع ٢ من انهيار نجوم ذات كتل مختلفة، ومن ثم يوجد تفاوت كبير في خصائصها من نجم لآخر. تنقسم المستعرات العظمى من النوع ١ إلى الأنواع (١أ) و(١ب) و(١ج)، اعتمادًا على تفاصيل شكلها وطيفها. والمستعرات العظمى من النوع (١أ) تثير الاهتمام على نحو خاص؛ إذ إن لها ذروة سطوع واحدة؛ بسبب أنه يُعتقد أنها ناتجة عن نفس نوع الانفجار. والنموذج المعتاد لهذه الأحداث يتمثل في مراكمة قزم أبيض للكتلة عن طريق اكتسابها من نجم آخر ملازم له. وحين تتجاوز كتلة القزم الأبيض حدًّا حرجًا للكتلة يُسمى «كتلة شاندراسيخار» (حوالي ١٫٤ مرة قدر كتلة الشمس)، تنفجر أجزاؤه الخارجية، بينما تنهار أجزاؤه الداخلية على نفسها. وبما أن الكتلة الداخلة في الانفجار تكون مقاربة على الدوام للكتلة الحرجة، فَيُتوقَّع أن ينتج عن هذه الأجرام دائمًا تحرير القدر عينه من الطاقة. وانتظام خصائص المستعرات العظمى من النوع (١أ) يعني أنها واعدة للغاية من حيث إمكانية استخدامها في اختبار انحناء الزمكان وتباطؤ معدل تمدد الكون.

مكَّنت التقنيات الجديدة علماء الفلك من البحث عن (والعثور على) المستعرات العظمى من النوع (١أ) في مجرات بإزاحة حمراء تقارب الواحد الصحيح. (تذكَّر أن هذا يعني أن الكون تمدد بمعامل قدره اثنان خلال الوقت الذي قطعه الضوء من المستعر الأعظم إلينا.) ويمكن لمقارنة السطوع المرصود للمستعرات العظمى البعيدة بتلك القريبة أن تُمِدَّنا بتخمين تقريبي لمقدار بُعدها عنا. وهذا بدوره من شأنه أن يُخبرنا بالمعدل الذي كان الكون يتباطأ به خلال الزمن الذي استغرقه الضوء في الوصول إلينا. المشكلة أن هذه المستعرات العظمى أشد خفوتًا مما ينبغي لها أن تكون عليه لو أن تمدُّد الكون آخِذٌ في التباطؤ. فالكون لا يتباطأ حقًّا في تمدده، وإنما يتسارع.

هذه المشاهدات تقلب التوصيف القياسي لعلم الكونيات الذي تجسده معادلات فريدمان رأسًا على عقب. فمن المفترض بكل هذه النماذج أن يكون فيها الكون متباطئًا. وحتى نماذج فريدمان التي تكون فيها قيمة $\Omega$ منخفضة، والتي يكون فيها التباطؤ طفيفًا للغاية بسبب كثافتها المنخفضة؛ ليس من المفترض بها أن تتسارع. والنماذج ذات الكثافة الحرجة التي يفضلها التضخم فيما يبدو ينبغي لها أن تمر بتباطؤ شديد. فما الخطأ الذي وقع؟

## أم تُراها أعجوبة أينشتاين الكبرى؟

لا تزال مشاهدات المستعرات العظمى التي تحدثتُ عنها محل خلاف، لكن يبدو أنها تشير بالتأكيد إلى أن ثمة حاجة إلى تغيير جذري في النظرية الكونية. من ناحية أخرى، هناك علاج جاهز لتلك المشكلة يرجع إلى وقت أينشتاين نفسه. في الفصل الثالث ذكرتُ كيف غيَّر أينشتاين نظريته الأصلية للجاذبية عن طريق استحداث ثابت كوني. وكانت الأسباب التي دعتْه لهذا الفعل — الذي نَدِم عليه فيما بعد — هي أنه أراد صياغة نظرية يمكنها وصف كون ساكن (أي غير متمدد). وقد غيَّر ثابتُه الكوني قانونَ الجاذبية بحيث يمنع المكان من التمدد أو الانكماش على السواء. وفي السياق الحديث، من الممكن استحداث الثابت الكوني بحيث يصير قانون الجاذبية طاردًا على النطاقات الكبيرة. وإذا حدث هذا، فإن نزعة قوة الجذب التثاقلية للمادة إلى إبطاء الكون ستتغلب عليها قوة طرد كونية تجعل الكون يتسارع في تمدده.

بطبيعة الحال يتطلب هذا الحل أن يتقبل المرء فكرة أن الثابت الكوني لم يكن فكرة سيئة في المقام الأول. لكن النظريات الحديثة تمنحنا أيضًا فهمًا جديدًا للكيفية التي

يمكن أن يحدث بها هذا. في نظرية أينشتاين الأصلية، ظهر الثابت الكوني في المعادلات الرياضية؛ كي يصف الجاذبية وانحناء الزمكان. وقد كان في حقيقة الأمر تعديلًا لقانون الجاذبية. لكن كان بإمكان أينشتاين بالمثل أن يكتب هذا الحد على الجانب الآخر من معادلاته، في جزء النظرية الذي يصف المادة. وعلى الجانب الآخر من معادلات أينشتاين، يظهر الثابت الكوني الشهير بوصفه حدًّا يصف كثافة الطاقة في الفراغ. قد تبدو فكرة الفراغ الذي يتمتع بطاقةٍ فكرةً عجيبةً، لكننا تناولناها بالفعل في موضع سابق من هذا الفصل. وهذه الطاقة هي المطلوبة تحديدًا من أجل التسبب في التضخم.

في النُّسَخ المبكرة من نظرية التضخم الكوني، تختفي طاقة الفراغ التي حررها التحول الطوري البدائي بعد انقضاء فترة التمدد المفرط العابرة. لكن ربما ظل قدرٌ ضئيل من هذه الطاقة باقيًا إلى الآن، وهذه هي الطاقة التي جعلتْ قوة الجاذبية قوة طرد بدلًا من أن تكون قوة جذب. إن الفكرة التي تقضي بأن طاقة الفراغ هذه قد تكون هي المسبِّبَة للتسارع تمكِّننا أيضًا من التوفيق بين نظرية التضخم والأدلة، على أن قيمة Ω ربما تكون أقل كثيرًا من القيمة التي كانت ستمتلكها لو كان المكان منبسطًا. فبينما تعمل طاقة الفراغ على نحو معاكس؛ من حيث إنها تجعل الجاذبية قوة طاردة بدلًا من أن تكون قوة جاذبة، فإنها على الأقل تحني المكان بالطريقة عينها التي تحنيه بها المادة العادية. وإذا كان الكون به كلٌّ من المادة وطاقة الفراغ فعندئذٍ يمكن أن يكون المكان منبسطًا دون وجود للتباطؤ الذي يفرضه أي نموذج اعتيادي من نماذج فريدمان.

ما زلنا لا نعرف يقينًا هل الكون يتسارع في تمدده أم لا، أو هل ثمة وجود لطاقة الفراغ أم ليس لها وجود، أو نعلم حتى القيمة الدقيقة لـ Ω. بَيْدَ أن هذه الأفكار أثارتْ نشاطًا كبيرًا على مدار السنوات القليلة الماضية في الجانبين النظري والتجريبي. وهناك جيل جديد من القياسات الآتية في الطريق التي يمكنها — إذا نجحتْ — أن تجيب عن كل هذه الأسئلة. وسأناقش هذه القياسات في الفصل التالي.

الفصل السابع

# البِنَى الكونية

المجرات هي الوحدات البنائية الأساسية للكون. بَيْدَ أنها ليست أكبر البِنَى التي يمكن رؤيتها. فالمجرات لا تميل إلى الوجود على نحو منعزل، وإنما تحب التجمع معًا، شأنها في هذا شأن البشر. والمصطلح المستخدم لوصف الطريقة التي تتوزع بها المجرات عبر المسافات الكونية هو «البنية واسعة النطاق». ويعد أصل هذه البنية أحد أكثر موضوعات علم الكونيات احتدامًا، لكن قبل أن نفسر السبب وراء ذلك، من الضروري أولًا أن نصف الماهية الفعلية لهذه البنية.

## أنماط في الفضاء

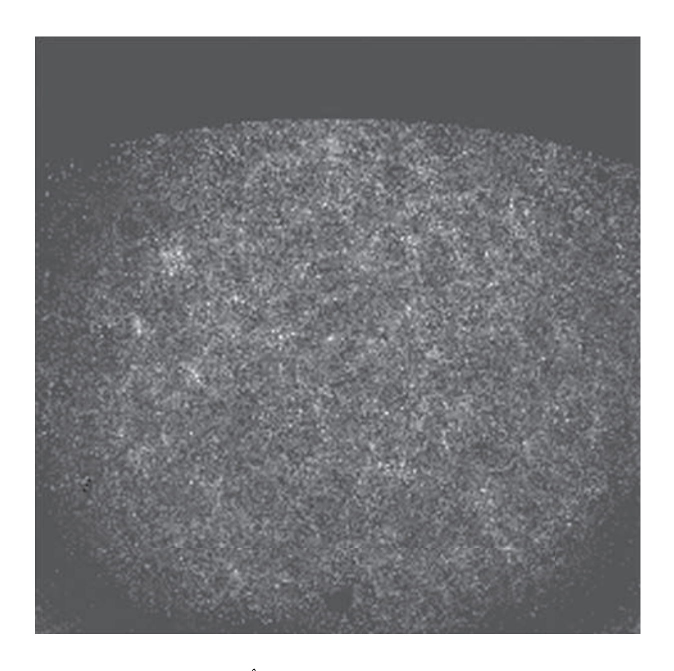
يتحدد توزيع المادة على النطاقات الواسعة عادةً بواسطة عمليات المسح الطيفي التي تستخدم قانون هابل في تقدير المسافات إلى المجرات من خلال إزاحتها الحمراء. وقد كان وجود البنية معروفًا لسنوات عديدة قبل أن تصير عمليات المسح بواسطة الإزاحة الحمراء قابلةً للتطبيق. وتوزيع المجرات على السماء يتسم بعدم التناسق الشديد، وهو ما يمكن رؤيته في أول مسح منهجي كبير لمواضع المجرات، والذي نتج عنه «خرائط ليك». لكن رغم ما تتسم به هذه الخريطة من إبهار دون شك، فلا يسع المرءَ أن يكون متأكدًا مما إذا كانت البِنَى التي يراها بها بِنًى حقيقية مادية أم أنها محض تأثيرات إسقاط عشوائية. فعلى أي حال، كلنا يعرف كوكبات النجوم، بيد أن هذه الكوكبات ليست ارتباطات مادية. والنجوم الموجودة بها تقع على مسافات مختلفة من الشمس. ولهذا السبب، صارت الأداة الأساسية لعلم وصف الكون هي الإزاحة الحمراء.

ثمة مثال شهير على هذا النهج، وهو المسح الذي أجراه مركز هارفرد سميثسونيان للفيزياء الفلكية، والذي نَشر أُولى نتائجه عام ١٩٨٦. كان هذا مسحًا للإزاحة الحمراء



شكل ٧-١: سديم أندروميدا. تُعَدُّ أندروميدا — أقرب مجرة حلزونية إلى مجرة درب التبانة — مثالًا طيبًا على هذا النوع من المجرات. ليست كل المجرات حلزونية، والعناقيد المجرِّية الثرية كعنقود الهلبة المجرِّي تحتوي بالأساس على مجرات بيضاوية ليست لها أذرع حلزونية.

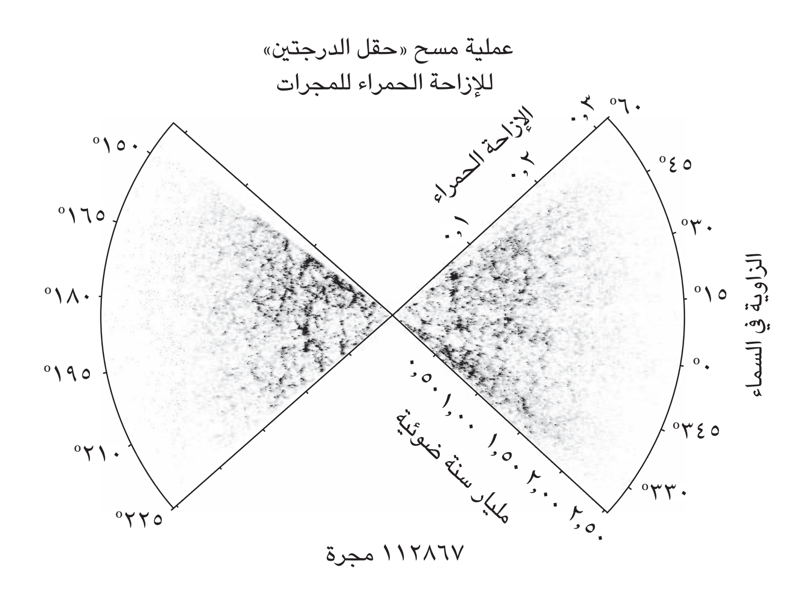
لعدد ١٠٦١ مجرة موجودة في شريط ضيق من السماء في مسح بالومار الأصلي للسماء، المنشور عام ١٩٦١. وقد تم التوسع في هذا المسح ليشمل المزيد من الشرائط على يد الفريق عينه. وحتى عام ١٩٩٠ كانت عمليات مسح الإزاحة الحمراء بطيئة ومُجْهدة؛ لأنه كان من الضروري توجيه التليسكوب صَوْبَ كل مجرة في المرة الواحدة، ثم أَخْذ القياسات الطيفية الخاصة بها، وحساب الإزاحة، ثم الانتقال نحو المجرة التالية. وكان الحصول على عدة آلاف من الإزاحات الحمراء يستغرق شهورًا من وقت التليسكوب، وهو الوقت الذي كان ينتشر على مدار سنوات عدة؛ بسبب توزيع وقت التليسكوب على عمليات الرصد المختلفة. وفي وقت قريب نسبيًّا مكَّن اختراع أجهزة الرصد المتعددة الألياف في تليسكوبات الحقول المفتوحة علماءَ الفلك من التقاط ما يصل إلى ٤٠٠ طيف في التوجيه الواحد للتليسكوب. ومن بين أحدث أجيال عمليات مسح الإزاحة الحمراء تلك المسماةُ عمليةَ مسح «حقل الدرجتين»، التي تديرها كلٌّ من المملكة المتحدة وأستراليا باستخدام التليسكوب الأنجلو-أسترالي. وسوف ترسم عملية المسح هذه في نهاية المطاف خريطة لمواضع نحو ٢٥٠ ألف مجرة.



شكل ٧-٢: «خريطة ليك». تُظهِر «خريطة ليك»، التي أُنتجت بواسطة العدِّ البصري الدقيق للمجرات على أسطح المسح، توزيعَ حواليَّ مليون مجرة عبر السماء. إن نمط الخيوط والعناقيد مبهر، والكتلة الدائرية الكثيفة قرب المركز هي عنقود الهلبة المجري.

المصطلح العام المستخدَم لوصف التجمع المادي للعديد من المجرات هو «عنقود المجرات» أو «العنقود المجرِّي». ومن الممكن أن تتفاوت العناقيد المجرية بشدة من حيث الحجمُ والثراء. على سبيل المثال، مجرتنا — درب التبانة — عضو فيما يسمى «المجموعة المحلية» من المجرات، وهي عنقود صغير نسبيًّا من المجرات، المجرة الوحيدة الكبيرة بينها هي مجرة أندروميدا M31. وعلى النقيض تمامًا، يوجد ما يسمى «العناقيد المجرية الثرية»، والمعروفة أيضًا باسم «عناقيد أبيل»، والتي تحتوي مئاتٍ عدةً أو حتى آلاف المجرات في منطقة لا تتجاوز ملايين قليلة من السنوات الضوئية عرضًا؛ ومن الأمثلة البارزة القريبة على هذه الكيانات عنقودَا الهلبة والعذراء المجرِّيَّان. وفيما بين هذين النقيضين، يبدو أن المجرات موزَّعة في منظومات متفاوتة الكثافة على نحو تدريجي (أو

هرمي). وأشد عناقيد أبيل كثافة هي أجرام منهارة على نفسها تحافظ جاذبيتها الخاصة على تماسكها معًا. أما المنظومات الأقل ثراءً والأكثر انتشارًا مكانيًّا فقد لا تكون مترابطة بهذه الطريقة، وإنما قد تعكس ببساطة ميلًا إحصائيًّا عامًّا لتجمُّع المجرات معًا.




شكل ٧-٣: عملية مسح «حقل الدرجتين» للإزاحة الحمراء للمجرات. من المخطط أن تقيس عملية المسح هذه، والتي لا تزال جارية، الإزاحاتِ الحمراءَ لنحو ٢٥٠ ألف مجرة. ورغم عدم الانتهاء من بعض أجزاء عملية المسح، وهو ما يتسبب في قِطَع ناقصة في الخريطة، فإنه بمقدورنا أن نرى ظهور شبكة معقدة من البِنَى الممتدة حتى مسافة مليارات السنوات الضوئية من موضعنا.

ومع ذلك ليست العناقيد المجرية المنفردة أكبر البنى التي يمكن رؤيتها. فتوزيع المجرات على نطاقات تزيد عن حوالي ٣٠ مليون سنة ضوئية يكشف أيضًا عن درجة بالغة من التعقيد. وقد بيَّنتْ عملياتُ المسح الرصدية الحديثة أن المجرات ليست موزَّعة في «فقاقيع» شبه كروية، شأن عناقيد أبيل، وإنما أحيانًا ما تمتد كذلك في بِنًى شبه خطية تسمى «الخيوط»، أو في بِنًى مسطحة أشبه بالألواح على غرار تلك البنية المسماة

«السور العظيم». وهذه البنية أشبه بتجميعة ثنائية الأبعاد تقريبًا من المجرات، واكتُشفت عام ١٩٨٨ على يد علماء الفلك بمركز هارفرد سميثسونيان للفيزياء الفلكية. و«السور العظيم» لا تقلُّ أبعاده عن ٢٠٠ مليون سنة ضوئية في ٦٠٠ مليون سنة ضوئية، بينما يقل سُمكه عن ٢٠ مليون سنة ضوئية. وهو يحتوي آلافًا عدة من المجرات وله كتلة لا تقل عن ١٠^١٦ مرة قدر كتلة الشمس. والعناقيد الثرية نفسها متجمعة في تجميعات ضخمة مترابطة على نحو غير محكَم، تسمَّى «العناقيد الفائقة». والعديد من هذه العناقيد معروف، وهي تحتوي على نطاق واسع يتراوح بين عشرة عناقيد ثرية إلى ما يزيد عن الخمسين عنقودًا. وأشهر العناقيد المجرية الفائقة ذلك العنقود المسمى «عنقود شابلي الفائق»، أما أقربها إلينا فهو «العنقود الفائق المحلي» الذي مركزه عنقود العذراء المجري المذكور سابقًا، وهو بنية مسطحة توجد في المستوى الذي تتحرك فيه «المجموعة المحلية». ومن المعروف أن العناقيد المجرية الفائقة تصل أحجامها إلى نحو ٣٠٠ مليون سنة ضوئية، وتحتوي كتلةً تصل إلى ١٠^١٧ مرة قدر كتلة الشمس.

يُكمِّل هذه البنى مناطقُ شاسعة من الفضاء الخاوي تقريبًا، والعديد من هذه المناطق يبدو كرويَّ الشكل تقريبًا. وهذه «الفراغات» تحتوي عددًا من المجرات أقلَّ بكثير من المعتاد، وقد لا تحتوي أيةَ مجراتٍ على الإطلاق. وقد رُصدت فراغاتٌ في عمليات مسح الإزاحة الحمراء الواسعة النطاق لها كثافة تقل عن ١٠ بالمائة من متوسط الكثافة على نطاق يصل إلى ٢٠٠ مليون سنة ضوئية. وليس وجود هذه الفراغات الكبيرة بالأمر المفاجئ، في ضوء وجود العناقيد المجرية والعناقيد المجرية الفائقة على نطاقات كبيرة للغاية؛ وذلك لأنه من الضروري أن توجد مناطق ذات كثافة أقل من المتوسط كي توجد مناطق أخرى ذات كثافة أكبر من المتوسط.

إن الانطباع الذي يحصل المرء عليه عند النظر إلى خرائط البنى الواسعة النطاق هو أنه توجد «شبكة» كونية شاسعة؛ شبكة معقدة من السلاسل والألواح المتفاعلة. لكن من أين جاء كل هذا التعقيد؟ إن نموذج الانفجار العظيم مبني على افتراض مفاده أن الكون متَّسق ومتجانس؛ أي إنه يتوافق مع المبدأ الكوني. ولحسن الحظ يبدو أن البِنى تختفي بالفعل في النطاقات الأكبر من نطاق تلك الشبكة الكونية. وقد تأكد هذا أيضًا من واقع المشاهدات الخاصة بإشعاع الخلفية الميكروني الكوني، الذي يأتينا من الكون المبكر بعد أن انتقل عبر خمسة عشر مليار سنة ضوئية. إن الخلفية الكونية تبدو متجانسة على نحوٍ شبه تام في السماء، وهو ما يتفق مع المبدأ الكوني. لكنها متجانسة على نحو «شبه» تام، لا على نحو تام.

## تكوُّن البِنى

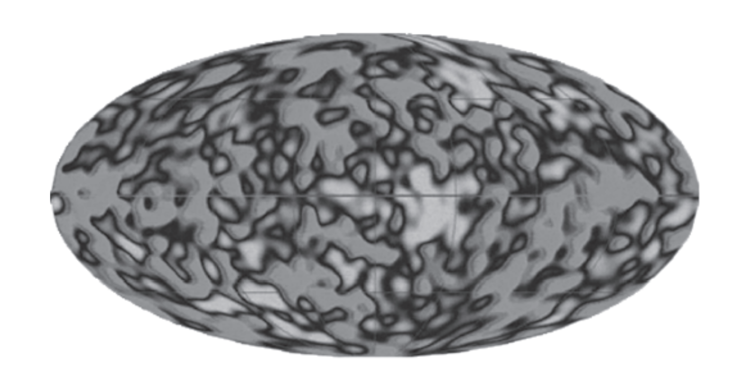
عام ١٩٩٢ نشر القمر الصناعي المسمى «مستكشف الخلفية الكونية» لاقطاته الحساسة بهدف رصد ورسم أي تفاوتات في درجة حرارة الخلفية الكونية في السماء. فمنذ اكتشاف الخلفية الكونية عام ١٩٦٥ وهي تبدو متوحدة الخواص في السماء. ولاحقًا، اكتُشف أن ثمة تفاوتًا واسع النطاق في درجة الحرارة عبر السماء يبلغ نحو جزء واحد في الألف. يُعرف هذا الآن بأنه من تأثير دوبلر، الذي تسبب فيه دوران الأرض حول نفسها عبر المجال الإشعاعي المتخلف عن الانفجار العظيم؛ إذ تبدو السماء أكثر دفئًا بقليل في الاتجاه الذي نتحرك صوبه، فيما تبدو أبرد قليلًا في الاتجاه الذي نبتعد عنه. لكن إذا نحَّيْنا هذا التفاوت «ثنائي القطب» (كما يطلق عليه) جانبًا، يبدو الإشعاع وكأنه يأتي على نحو متساوٍ من كل الاتجاهات. لكن لوقت طويل والمنظِّرون يتشككون في وجود بنية في الخلفية الميكرونية، على صورة أنماط متذبذبة من البقع الحارة والباردة. وقد عثر «مستكشف الخلفية الكونية» على هذه الأنماط، وأبرزت الصحف حول العالم اكتشافه هذا.

لماذا إذن لا تتسم الخلفية الميكرونية بالتجانس؟ إجابة هذا السؤال مرتبطة على نحو وثيق بأصل البنية الواسعة النطاق، وشأن المواضع الأخرى في علم الكونيات، تقدم الجاذبية ذلك الرابط.

تُقدِّم نماذج فريدمان أفكارًا ثاقبة مهمة بشأن الكيفية التي تتغير بها الخصائص الكبيرة الخاصة بالكون؛ تتغير مع الزمن. بَيْدَ أن هذه النماذج غير واقعية؛ لأنها تصف عالمًا مثاليًّا متجانسًا تمامًا وخاليًا من أي خلل. والكون إن بدأ على هذا النحو فسيظل مثاليًّا إلى الأبد. لكن في الواقع الفعلي، هناك مواضع من الخلل. فبعض المناطق قد تكون أكثر كثافة قليلًا من المتوسط، وبعضها أقل كثافة. كيف سيكون سلوك هذا الكون الذي يشوبه قدرٌ من التفاوت في الكثافة؟ الإجابة مختلفة على نحو جذري عن الحالة المثالية. فأي جزء من الكون أشد كثافة من المتوسط سيكون له تأثير جذبي أقوى من المتوسط على ما يحيط به؛ ومن ثم سيميل إلى امتصاص المادة داخله، مستنزفًا بذلك المنطقة المحيطة به. وخلال هذه العملية سيصير أشد كثافة نسبة إلى المتوسط، ومن ثم يمارس قوة جذب أكبر. ويكون الأثر المترتب على ذلك حدوث نمو منفلت لتكتلات المادة يسمى «عدم الاستقرار الجذبي». وفي النهاية تتكون كتل مترابطة بقوة وتبدأ في التجمع على صورة خيوط وألواح تشبه تلك التي نراها في خرائط البنية الكونية. وكل ما هو مطلوب

في البداية من أجل إطلاق هذه العملية هو تفاوتات طفيفة للغاية في الكثافة، وستعمل الجاذبية كمضخِّم قوي محوِّلة التموجات الأولية الطفيفة إلى تفاوتات ضخمة في الكثافة. وبإمكاننا تخطيط الناتج النهائي لهذه العملية باستخدام عمليات المسح التي تُجرَى على المجرات، بينما نرى المُدخل الأوَّلي لها في خريطة «مستكشف الخلفية الكونية». بل إن لدينا كذلك نظرية جيدة تفسر الكيفية التي انطبعت بها التفاوتات الأولية في الكثافة، وكيف أنتج التضخم الكوني التفاوتات الكمية.

إن الصورة العامة الأساسية للكيفية التي تكونت بها المادة معروفة منذ سنوات عديدة، لكن من العسير تحويل هذه الصورة العامة إلى حسابات تنبُّئِية تفصيلية؛ وذلك بسبب السلوك المعقد للجاذبية. ذكرتُ في الفصل الثالث أن قوانين نيوتن للجاذبية من الصعب حلُّها من دون التناظر المبسِّط. وفي المراحل المتأخرة من عدم الاستقرار الجذبي، لا وجود لمثل هذا التبسيط. فكل شيء في الكون يمارس قوى الجذب على كل شيء آخر، ومن الضروري متابعة كل هذه القوى المؤثرة في كل شيء وفي كل مكان. والمسائل الحسابية الداخلة في هذه العملية من المستحيل فعليًّا حلها بالورقة والقلم.

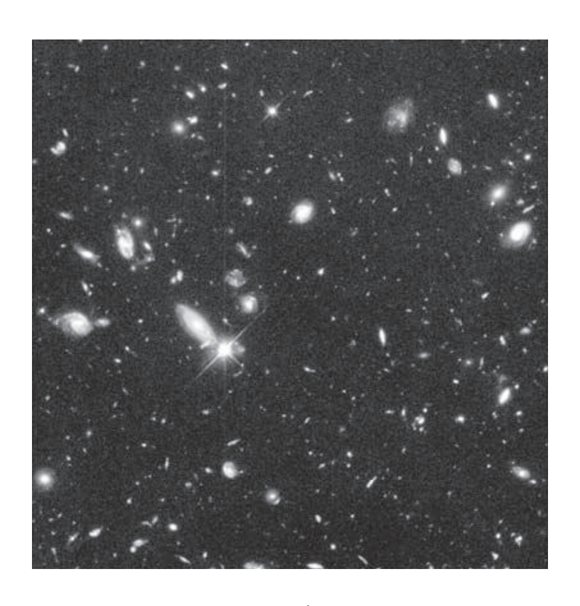


شكل ٧-٤: تموجات «مستكشف الخلفية الكونية». في عام ١٩٩٢ قاس القمر الصناعي المسمى «مستكشف الخلفية الكونية» تفاوتات طفيفة قدْرها نحو جزء واحد في المائة ألف في درجة حرارة إشعاع الخلفية الميكروني الكوني في السماء. وهذه «التموجات» يُعتقَد أنها البذور التي نمتْ منها المجرات والبِنى الكونية الواسعة النطاق.

لكن خلال ثمانينيات القرن العشرين، ظهرت أجهزة الكمبيوتر الضخمة على الساحة، وشهد هذا المجال تقدمًا متسارعًا. وقد صار من الواضح أن بمقدور الجاذبية تكوين البنى الكونية، لكن كي تؤدي المهمة بفَعَالِيَة لا بد من وجود قدر كبير للغاية من الكتلة في الكون. ولأن فرضيات التخليق النووي البدائي لا تسمح إلا بوجود قدر صغير نسبيًّا من المادة «العادية»، افترض المنظِّرون أن الكون تهيمن عليه مادة مظلمة عجيبة لا تشارك في التفاعلات النووية. وقد أظهرت المحاكاة الحاسوبية أن أفضل صورة تكون عليها هذه المادة هي المادة المظلمة «الباردة». فإذا كانت المادة المظلمة «حارة»، فستتحرك عندئذٍ بسرعة كبيرة تمنع تكوُّن كتل من المادة بالحجم المناسب.

وفي النهاية، بعد سنوات عديدة من وقت المحاكاة الحاسوبية، ظهرت صورة تنشأ فيها البنية الكونية بطريقة تدريجية تراكمية. أولًا: تتكون كتل صغيرة من المادة. وهذه الوحدات البنائية تتجمع بعد ذلك مكوِّنةً وحداتٍ أكبرَ، وهي بدورها تتجمع بعضُها مع بعضٍ مكونة وحدات أكبر، وهكذا دَوَالَيْك. وفي النهاية تتكون أجرام في حجم المجرات. ينهار الغاز (المكون من مادة باريونية) على نفسه، وتتكون النجوم، وتكون لدينا مجرات. وتواصل المجرات نموها الهرمي في البنية عن طريق التجمع في سلاسل وألواح. وفي هذه الصورة، تتطور البنية بسرعة كبيرة مع مرور الزمن (أو على نحو مكافئ، مع الإزاحة الحمراء).

حققت فكرة المادة المظلمة الباردة نجاحًا كبيرًا، لكن هذا النهج أبعد ما يكون عن الاكتمال. فلا يزال من غير المعروف مقدار المادة المظلمة الموجود في الكون، أو الشكل الذي تتخذه هذه المادة. تظل أيضًا مشكلة الكيفية التفصيلية التي تكونت بها المجرات دون حل؛ وذلك بسبب العمليات الهيدروديناميكية والإشعاعية الداخلة في حركة الغاز وتكوُّن النجوم. لكن في الوقت الحالي لم يَعُدْ هذا المجال مقصورًا على النظريات والمحاكاة الحاسوبية؛ إذ تُمَكِّننا الإنجازات المتحققة حاليًّا في التكنولوجيا الرصدية، على غرار تليسكوب هابل الفضائي، من أن نرى المجرات على إزاحات حمراء عالية، ومن ثم ندرس بدقةٍ الكيفية التي تغيرت بها خصائصها وتوزيعاتها في الفضاء مع مرور الوقت. ومع الجيل القادم من عمليات مسح الإزاحة الحمراء الضخمة سيكون لدينا معلومات شديدة التفصيل بشأن النمط الذي تسير عليه تلك المجرات في الفضاء. وهذا أيضًا يمدنا بخيوط عن مقدار المادة المظلمة الموجودة بالكون، والكيفية التي تكونت بها المجرات تحديدًا. بَيْدَ أن الحل النهائي لهذه المشكلة ليس من المرجح أن يأتي من المشاهدات الخاصة بالنواتج النهائية لعملية عدم الاستقرار الجذبي، وإنما من تلك المتعلقة ببداياتها.

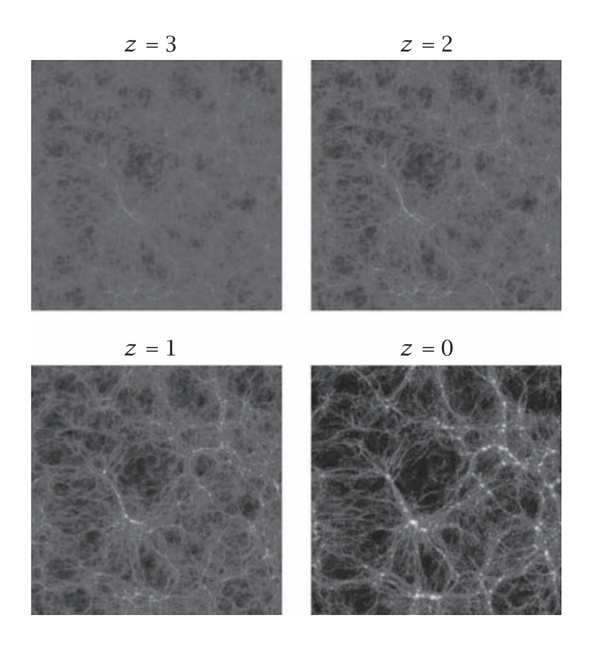


شكل ٧-٥: صورة «حقل هابل العميق». التُقطت هذه الصورة عن طريق توجيه تليسكوب هابل الفضائي إلى قطعة خالية من السماء، وهي تُظهر مصفوفة رائعة من المجرات البعيدة الخافتة. بعض هذه الأجرام يقع على مسافات بعيدة للغاية، لدرجة أن الضوء الصادر عنها استغرق أكثر من ٩٠ بالمائة من عمر الكون كي يصلنا. وبهذا يمكننا رؤية تطور المجرات وهو يحدث أمام أعيننا.

## صوت الخلق

مثَّل «مستكشف الخلفية الكونية» تقدمًا كبيرًا في دراسة تكوُّن البنية الكونية، بَيْدَ أنه من نواحٍ عدة تُعَدُّ هذه التجربة محدودة للغاية. وأبرز مواطن قصور مستكشف الخلفية الكونية هو أنه يفتقد القدرة على سَبْر أغوار البنية التفصيلية للتموجات في الخلفية الكونية. وفي الواقع كانت الدقة الزاويَّة لمستكشف الخلفية الكونية لا تتجاوز عشر درجات فحسب، وهو مقدار بسيط للغاية بالمعايير الفلكية. وعلى سبيل المقارنة، يبلغ عرض القمر وهو بدر حوالي نصف درجة عرضًا. ويأمل علماء الكونيات أن يجدوا في البنية الدقيقة للخلفية الميكرونية إجابات للعديد من الأسئلة الحاضرة بقوة.

أُنتجت التموجات في الكون المبكر بواسطة نوع من الموجات الصوتية. فحين كان الكون حارًّا للغاية، تصل درجة حرارته إلى عدة آلاف درجة، كان يعج بالموجات الصوتية الآخذة في التحرك جيئة وذهابًا. وسطح الشمس له درجة حرارة مشابهة، وهو يهتز بطريقة مماثلة. وبسبب الدقة المنخفضة لمستكشف الخلفية الكونية فإنه استطاع رصد تلك التموجات التي لها طول موجي طويل وحسب. وهذه التموجات تمثل موجات صوتية ذات درجة منخفضة للغاية؛ النغمة الخفيضة لعملية الخلق. والمعلومات التي تحويها هذه الموجات مهمة، لكنها ليست تفصيلية؛ فصوتها رتيب نسبيًّا.




شكل ٧-٦: محاكاة حاسوبية لتكوُّن البِنى. ابتداءً من ظروف ملساء تقريبًا، يمكن استخدام أجهزة الكمبيوتر الفائقة الحديثة في محاكاة تطور قطعة من الكون مع مرور الزمن. في هذا المثال، الذي أجراه «اتحاد العذراء»، يمكننا أن نرى التجمع الهرمي يتطور مع تمدد الكون بمُعامل قدره ٤. العُقَد الكثيفة التي تُرى في الإطار الأخير تكوِّن مجرات وعناقيد مجرية، بينما البنى الخطية تشبه بشدة تلك التي تُرى في عمليات المسح الخاصة بالمجرات.

على الجانب الآخر، من المفترض أن يُنتج الكون أيضًا صوتًا ذا درجة أعلى، وهذا أمر أكثر إثارة للاهتمام بكثير. فموجات الصوت تنتقل بسرعة محددة. وفي الهواء، على سبيل المثال، تكون هذه السرعة نحو ٣٠٠ متر في الثانية. في الوقت المبكر من عمر الكون، كانت سرعة الصوت أكبر بكثير؛ بحيث كانت تقارِب سرعة الضوء. وبحلول الوقت الذي أُنتجت فيه الخلفية الميكرونية كان عمر الكون حوالي ٣٠٠ ألف عام. وخلال الوقت المنحصر بين ذلك الوقت وبين الانفجار العظيم، الذي يُفترض أن موجات الصوت استُثيرت فيه في المقام الأول، لم يكن بوسع تلك الموجات الانتقال إلا لحوالي ٣٠٠ ألف سنة ضوئية. والذبذبات التي لها هذا الطول الموجي تنتج «نغمة» مميزة، تشبه النغمة الأساسية لأي آلة موسيقية. ومن ثم ليس من قبيل المصادفة أن تكون العناقيد المجرية الفائقة بهذا الحجم؛ إذ إنها نتجت عن هذا اللحن الكوني المجلجِل.

ينبغي أن يكشف الطول الموجي المميز للكون المبكر عن نفسه في صورة أنماط من البقع الحارة والباردة على الخلفية الميكرونية في السماء، لكن لأن الطول الموجي قصير إلى حدٍّ بعيد، فإنه يظهر على نطاق أدق كثيرًا من ذلك الذي يستشعره مستكشف الخلفية الكونية. في الواقع، يصل الحجم الزاويُّ للبقع التي ينتجها إلى حوالي درجة واحدة. ومن ثم، منذ إطلاق مستكشف الخلفية الكونية وهناك سباق دائر؛ من أجل تطوير المَعَدَّات القادرة على رصد النغمة الأساسية للكون، فضلًا عن النغمات الأعلى المتوافقة معها. ومن خلال تحليل دقيق لصوت عملية الخلق، من المأمول أن يُجاب عن العديد من الأسئلة الكبرى التي تواجه علم الكونيات الحديث. فطيف الصوت يحتوي معلومات بشأن مقدار المادة الموجودة في الكون، وهل هناك ثابت كوني أم لا، ومقدار ثابت هابل، وهل المكان منحنٍ، بل وربما هل حدث التضخم أم لا.

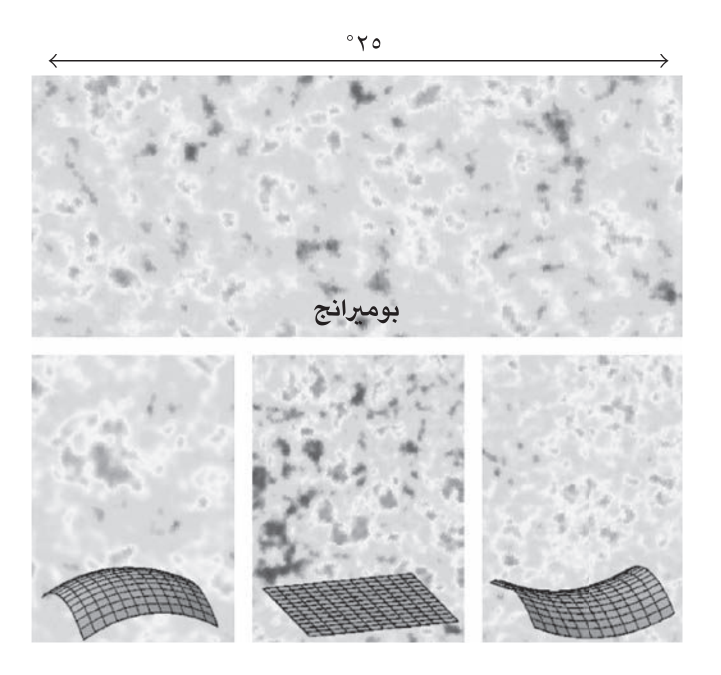
ثمة تجربتان كبيرتان، هما «مسبار قياس تباين الأشعة الكونية» المُزمَع إطلاقه عام ٢٠٠١ تحت إشراف ناسا، و«مرصد بلانك الفضائي» تحت إشراف وكالة الفضاء الأوروبية المزمع إطلاقه في غضون سنوات قليلة، من شأنهما أن يرسما خرائط تفصيلية لأنماط التموجات على السماء بدقة عالية جدًّا. وإذا صح تأويل هذه البِنى، فمن المفترض أن يكون لدينا إجابات محددة في وقت قريب للغاية. والجميع ينتظر هذه النتائج بفارغ الصبر.

في الوقت الحالي، ثمة إشارات قوية للغاية بشأن الكيفية التي ستئول إليها الأمور. فقد حلَّلتْ تجربتان مهمتان تم إجراؤهما من على المناطيد — هما «بوميرانج»



شكل ٧-٧: تجربة «بوميرانج». تُظهر الصورة هذه التجربة بينما هي على وشك الإطلاق على متن منطاد فوق القارة القطبية الجنوبية. معدات التجربة موجودة على المركبة إلى يمين الصورة. مسار الطيران الخاص بهذا المنطاد مر بالقطب الجنوبي، واستفاد من الرياح الدوارة من أجل العودة بالقرب من نقطة الانطلاق. القارة القطبية الجنوبية جافة للغاية، وهو ما يجعل منها أفضل مكان على الأرض لإجراء تجارب الخلفية الميكرونية، بَيْدَ أنه لا يزال من الأفضل الخروج إلى الفضاء إن أمكن.

و«ماكسيما» — أجزاءً صغيرة من السماء بدقة تقل بقدر طفيف عن دقة «مسبار قياس تباين الأشعة الكونية» و«مرصد بلانك الفضائي». لم تقدم هاتان التجربتان بعدُ إجابات حاسمة، لكنهما تشيران إلى أن هندسة المكان منبسطة. والحجة التي يقوم عليها هذا الافتراض بسيطة. فنحن نعلم الطول الموجي المميِّز للأصوات التي أنتجت الملامح المقيسة، ونعلم المسافة التي رُصدت عليها هذه الموجات (حوالي ١٥ مليار سنة ضوئية)، ومن ثم يمكننا حساب الزاوية التي من المفترض أن تحتلها في السماء لو كان الكون منبسطًا. فإذا كان الكون مفتوحًا فستكون الزاوية أقل مما هو الحال في الكون المنبسط، وإذا كان مغلقًا فستكون الزاوية أكبر. والنتائج تشير ببساطة إلى أن الكون منبسط. وإلى




شكل ٧-٨: انبساط المكان. يُظهِر الإطار العلوي النمط الدقيق لتفاوتات الحرارة المقيسة بواسطة التجربة «بوميرانج». وأسفل منه يوجد أنماط مصنوعة بالمحاكاة الحاسوبية تأخذ في الاعتبار الحجم الزاوي المتوقع لهذه التفاوتات في كلٍّ من الكون المغلق والمفتوح والمنبسط. ويتحقق التطابق الأفضل مع نموذج الكون المنبسط (في المنتصف). وقد منحت هذه الإشارة القوية دافعًا أقوى للتجربتين المستقبليتين «مسبار قياس تباين الأشعة الكونية» و«مرصد بلانك الفضائي» اللتين سترسمان خريطة للسماء كلها بهذه الدقة.

جانب التسارع الذي تحدثتُ عنه في الفصل السابق، تمنحنا هذه القياسات دليلًا قويًّا على وجود ثابت كوني. والطريقة الوحيدة كي يكون لدينا كون منبسط ومتسارعٌ أيضًا في تمدده هي أن توجد بالكون طاقة فراغ.

ويبدو أن الصورة الآخذة في الظهور من واقع دراسات البنية الكونية تتفق مع الخيوط الأخرى التي ناقشتها، لكننا ما زلنا لا نعرف الكيفية التي تمكَّن بها الكون من

أن يصير على النحو الذي هو عليه. وستعتمد إجابة هذا اللغز الأعمق على فهمنا الأعمق لطبيعة المادة والمكان والزمن. وسأناقش هذه الأمور في الفصل التالي.

الفصل الثامن

# نظرية كل شيء

بدأت الحقبة الحديثة للفيزياء بثورتين حدثتا في السنوات الأولى من القرن العشرين. اشتملت إحدى هاتين الثورتين على استحداث مبدأ النسبية، وقد لعبت النسبية دورًا في تطور علم الكونيات على مدار هذا القرن. أما الثورة الثانية فكانت مولد ميكانيكا الكَمِّ. وعلى النقيض، لا تزال تأثيرات فيزياء الكم في علم الكونيات بعيدةً عن الفهم.

## عالم الكم

وفق النظرية الكمية فإن كل كيان في العالم له طبيعة مزدوجة. ففي الفيزياء الكلاسيكية استُخدم مفهومان متمايزان لوصف ظاهرتين طبيعيتين متمايزتين، وهما: الموجات والجسيمات. لكن فيزياء الجسيمات تخبرنا أن هذين المفهومين لا ينطبقان بشكل منفصل على العالم الميكروسكوبي. فالأشياء التي كنا نعتقد سابقًا أنها جسيمات من الممكن أحيانًا أن تسلك سلوك الموجات، والظواهر التي كنا نَخَالُها سابقًا من الموجات من الممكن أحيانًا أن تسلك سلوك الجسيمات. الضوء مثلًا يسلك سلوك الموجة، وبإمكاننا أن ننتج تأثيرات التداخل والحيود باستخدام الموشورات والعدسات. علاوة على ذلك، بيَّن ماكسويل أن الضوء يوصف بالفعل رياضيًّا بواسطة معادلة تسمى «المعادلة الموجية»، وبذا تتنبأ هذه النظرية بالطبيعة الموجية للضوء. على الجانب المقابل، بيَّنت أعمال ماكس بلانك على الإشعاع المنبعث من الأجسام الساخنة أيضًا أن سلوك الضوء يجعله يبدو كما لو أنه يتكون من حزم منفصلة، أُطلِقَ عليها اسم «الكموم». وقد تردد في الزعم بأن هذه الكموم يمكن اعتبارها جسيمات. وفي الواقع كان ألبرت أينشتاين نفسه، خلال عمله على التأثير الكهروضوئي الذي نال عنه جائزة نوبل، هو مَن أخذ هذه الخطوة، وقال إن الضوء يتكون في حقيقته من جسيمات. وهذه الجسيمات صارت تُعرف لاحقًا

باسم «الفوتونات». لكن كيف يمكن للشيء ذاته أن يَكون موجة وجسيمًا معًا؟ علينا هنا القول إن الواقع لا يمكن توصيفه بدقة بواسطة مفهوم واحد فقط من الاثنين، وإنما يكون سلوكه أحيانًا كسلوك الموجة وأحيانًا كسلوك الجسيم.

تخيل أن هناك راهبًا من العصور الوسطى، وقد عاد إلى ديره بعد رحلته الأولى إلى أفريقيا. وخلال رحلته تلك شاهد بالمصادفة خرتيتًا، وهو يحاول الآن أن يصفه لإخوته المتشككين. وبما أنه لم يسبق لأحد منهم أن رأى أي شيء غريب كالخرتيت رأْيَ العين، فعلى راهبنا أن يستعين بالتشبيهات لتقريب الصورة. فيقول إن الخرتيت يشبه في جانب منه التنين وفي جوانب أخرى الحصان وحيد القرن. وهنا يكون لدى إخوته تصوُّر معقول عما يبدو عليه هذا الحيوان. لكن لا التنين ولا الحصان وحيد القرن موجودان في الطبيعة من الأساس، بينما للخرتيت وجود. الأمر عينه ينطبق على عالمنا الكمي؛ فالعالم لا يوصَف من منظور الموجات المثالية ولا الجسيمات المثالية، وإنما يمكن لهذين المفهومين أن يمنحانا صورةً ما عن جوانب معينة لِمَا عليه الأشياء من حالٍ بالفعل.

إن الفكرة القائلة إن الطاقة تأتي في حزم منفصلة (أو كموم) طُبقت بنجاح أيضًا على أبسط الذرات قاطبة — ذرة الهيدروجين — على يد نيلز بور عام ١٩١٣ وطُبقت على جوانب أخرى للفيزياء الذرية والنووية. ووجود مستويات الطاقة المتمايزة داخل الذرات والجزيئات له أهمية جوهرية في مجال التحليل الطيفي، الذي يلعب دورًا في مجالات متنوعة على غرار الفيزياء الفلكية والطب الشرعي، وكانت له أهمية حاسمة في اكتشاف هابل لتباعد المجرات.

## الكون غير اليقيني

كان تقبُّل الطبيعة الكمية للطاقة (والضوء) محض بداية للثورة التي أسست ميكانيكا الكم الحديثة. وتعين الانتظار حتى عشرينيات القرن العشرين، وحتى أعمال كلٍّ من شرودنجر وهايزنبرج؛ ليتم أخيرًا تفسير الطبيعة المزدوجة للضوء بوصفه موجة وجسيمًا معًا. فرغم أن وجود الفوتونات قد جرى تقبله في السنوات السابقة على ذلك، فإنه لم يكن ثمة سبيل للتوفيق بين هذا وبين السلوك الموجي المعروف للضوء. وفي عشرينيات القرن العشرين ظهرت نظرية للفيزياء الكمية مبنية على الميكانيكا الموجية. وفي نسخة شرودنجر من نظرية الكم، يوصَف سلوك الأنظمة كلها من خلال دالة موجية (يرمز إليها بالرمز $\psi$) تتطور وفق معادلة سميت معادلة شرودنجر. وتعتمد الدالة الموجية $\psi$

على كلٍّ من المكان والزمن. وتصف معادلة شرودنجر الموجات التي تتذبذب في كلٍّ من المكان والزمن.

من أين إذن يأتي السلوك الجسيمي؟ الجواب هو أن الدالة الموجية الكمية لا تصف شيئًا ماديًّا مثلما تفعل الموجة الكهرومغناطيسية، التي يفكر فيها المرء بوصفها شيئًا ماديًّا موجودًا في نقطة من المكان وتتذبذب عبر الزمن، وإنما تصف الدالة الموجية الكمية «موجة احتمالية». وتؤكد نظرية الكم أن الدالة الموجية هي كل ما يستطيع المرء معرفته عن النظام؛ فليس بوسع المرء التنبؤ في يقينٍ بالموضع الذي سيكون فيه الجسيم تحديدًا في أي زمن بعينه، بل كل ما يمكن التنبؤ به هو احتمالية وجوده وحسب.

ومن الجوانب المهمة لازدواجية الموجة–الجسيم هذه «مبدأ عدم اليقين». لهذا المبدأ تبعات عدة على الفيزياء، لكن أبسطها تتضمن موضع الجسيم وسرعته؛ إذ ينص مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج على أنه ليس بوسعنا معرفة موضع أي جسيم وسرعته على نحو مستقل. فكلما عرفت موضع الجسيم على نحو أفضل، قلَّتْ معرفتك بسرعته، والعكس بالعكس. فإذا استطعت تحديد الموضع بدقة، فستصير سرعته مجهولة تمامًا، وإذا استطعت معرفة سرعة الجسيم بدقة، فمن الممكن أن يشغل الجسيم أي موضع كان. هذا المبدأ كمي، وهو لا ينطبق على الموضع والزخم فقط، بل ينطبق أيضًا على الطاقة والزمن وأي زوج آخر من الكميات المعروفة بأنها متغيرات مقترنة.

ومن التبعات المهمة للغاية لمبدأ عدم اليقين المتعلق بثنائية الطاقة–الزمن أن الفضاء الخاوي يمكنه أن ينتِج من العدم جسيمات قصيرة العمر تظهر إلى الوجود وتختفي منه بغتة على فترات زمنية يحكمها مبدأ عدم اليقين. وهذا هو السبب وراء أن فيزيائيِّي الجسيمات يتوقعون أن الفراغ به طاقة. بعبارة أخرى، ينبغي أن يوجد ثابت كوني. والمشكلة الوحيدة هي أنهم لا يعرفون كيفية حسابه. وأفضل التخمينات المتاحة حاليًّا أكبر بكثير من الواقع الفعلي بما يصل إلى مائة قيمة أُسية. بَيْدَ أن فكرة عدم اليقين الكوني أحرزت نجاحًا بارزًا؛ إذ يُعتقد أنه هو السبب وراء وجود تفاوتات الكثافة البدائية الضئيلة التي استهلَّت نمو البنية الكونية.

إن الكون الذي يسير وفق فيزياء نيوتن هو كون «حتمي»؛ بمعنى أنه إذا عرف المرء مواضع وسرعات كل الجسيمات داخل أي نظام في أي وقت بعينه، فعندها سيكون المرء قادرًا على أن يتنبأ بسلوكها في جميع الأوقات اللاحقة. لكن ميكانيكا الكم غيرت كل هذا؛ نظرًا لأن أحد المكونات الأساسية لهذه النظرية هو المبدأ القائل إنه على مستوًى

جوهري معين، يكون سلوك الجسيمات غير قابل للتنبؤ به، ومن ثم هناك حاجة لِلُّجوء إلى الحسابات الاحتمالية.

إن التفسير الذي يمكن وضعه بناءً على هذا النهج الاحتمالي عُرضة لجدال واسع. على سبيل المثال، تدبَّر نظامًا تتحرك فيه الجسيمات في حزمة ضوء نحو شقين يفصل بينهما مسافة بسيطة. الدالة الموجية $\psi$ المتجاوبة مع هذا الموقف تُظهر نمطَ تداخل؛ لأن «الموجة الاحتمالية» تمر عبر كلا الشقين. إحصائيًّا، من المفترض أن تهبط الفوتونات على اللوح الموجود خلف الشقين وفق الاحتمالية التي تُمليها الدالة الموجية. وبما أن الشقين يتسببان في نمط تداخل، فستظهر على اللوح سلسلة معقدة من الحزم الساطعة والباهتة في المواضع التي تُعَزِّز فيها الموجات بعضها بعضًا، وتلك التي تُلغي فيها الموجات بعضها بعضًا على الترتيب. يبدو هذا منطقيًّا، لكن افترضْ أنك خفضت قوة حزمة الضوء، وهو ما يمكن عمله؛ بحيث إنه في أي وقت بعينه لا يوجد سوى فوتون وحيد هو الذي يمر من الشقين. من الممكن رصد وصول كل فوتون على اللوح. وبتشغيل التجربة لفترة كافية من الوقت يمكننا بناء نمط على اللوح. ورغم حقيقة أن فوتونًا واحدًا فقط هو الذي يمر من الجهاز، فيظل يظهر على اللوح نمط الحزم الساطعة والباهتة. فبطريقة ما، يجب على كل فوتون منفرد أن يتحول إلى موجة حين يغادر المصدر، ويمر عبر الشقين كليهما، ويتداخل مع نفسه وهو في الطريق، ثم يعود مجددًا إلى وضعه كفوتون كي يهبط على موضع محدد على اللوح.

ما الذي يحدث إذن؟ من الجلي أن كل فوتون يهبط في موضع محدد على اللوح. وفي هذه النقطة نحن نعرف موضعه يقينًا. لكن ما الذي تفعله الدالة الموجية لهذا الجسيم في هذه النقطة؟ وفق أحد التفسيرات — ذلك المسمى «تفسير كوبنهاجن» — تنهار الدالة الموجية على نفسها بحيث تتركز في نقطة وحيدة. وهذا يحدث كلما أُجْرِيَتْ تجربة، وتمَّ الحصول على نتيجة محددة. لكن قبل أن تُحسم النتيجة، تكون الطبيعة نفسها غير محددة؛ فالفوتون لا يمر فعلًا عبر أيٍّ من الشقين؛ بل هو في حالة «مختلطة». وفعل القياس نفسه يغيِّر من الدالة الموجية، ومن ثم يُغيِّر من الواقع. وقد قاد هذا الكثيرين إلى التخمين بشأن التفاعل بين الوعي وبين «الواقع» الكمي. فهل الوعي هو ما يسبب انهيار الدالة الموجية على نفسها؟

من الأمثلة الموضِّحة الشهيرة لهذه المعضلة تلك المفارَقة المعروفة باسم «قطة شرودنجر». تخيل أن ثمة قطة موجودة داخل حجرة مغلقة تحتوي قِنِّينَةَ سُمٍّ. القِنِّينَة

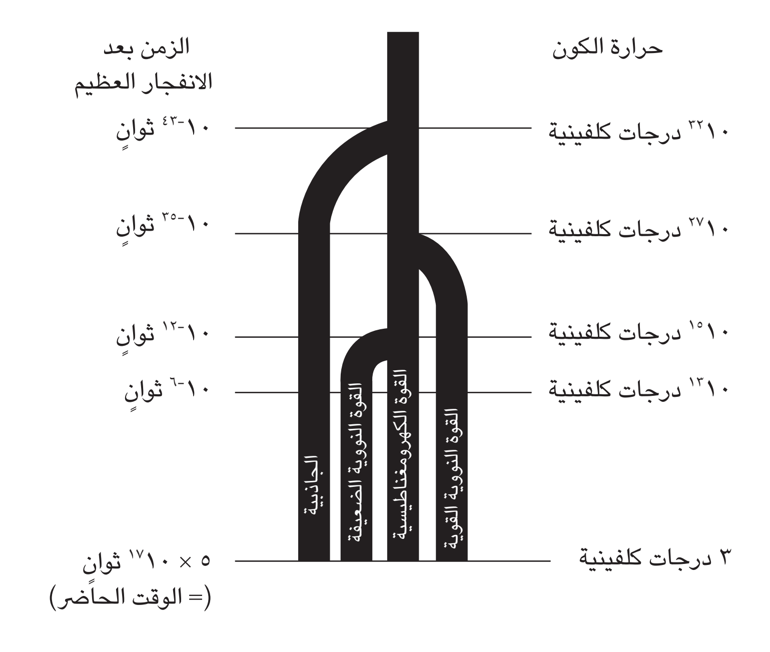
متصلة بأداة من شأنها أن تكسر القنينة وتسمم القطة عند حدوث أي حدث كمي، على غرار انبعاث جسيمات ألفا من مادة مشعة. وإذا انكسرت القنينة، تموت القطة بشكل فوري. أغلبنا سيتوقع أن تكون القطة إما حية وإما ميتة في أي وقت بعينه، لكن إذا تبنَّيْنا تفسير كوبنهاجن بجدية، فستكون القطة على الحالين كليهما في نفس الوقت بشكل ما؛ فالدالة الموجية للقطة تضم تراكبًا من الحالتين الممكنتين. وفقط حين تُفتَح الحجرة و«تقاس» حالة القطة «تصير» القطة وقتها إما حية وإما ميتة.

ثمة تفسير بديل لتفسير كوبنهاجن يقضي بأنه لا شيء يتغير ماديًّا على الإطلاق عند إجراء عملية القياس. فما يحدث هو أن حالة الراصد المعرفية هي التي تتغير. فإذا أكد أحدهم أن الدالة الموجية $\psi$ تمثِّل ما هو معروف للراصد بدلًا من أن تمثل ما هو حقيقي في الواقع، فلن تكون هناك مشكلة في أن تتغير هذه الدالة حين يصير معروفًا أن جسيمًا ما في حالة محددة. وهذه النظرة تقترح تفسيرًا لميكانيكا الكم قد تكون فيه الأشياء حتمية على مستوًى ما، بَيْدَ أننا لا نعرف ببساطة ما يكفي بحيث يمكننا التنبؤ.

وهناك نظرة أخرى؛ وهي تفسير «العوالم المتعددة». ووفق هذه النظرة في كل مرة تُجرَى فيها تجربة (على سبيل المثال، في كل مرة يمر فيها أحد الفوتونات من الجهاز ذي الشقين) فإن الكون، إذا جاز التعبير، ينقسم إلى كونين؛ في أحدهما يمر الفوتون من الشق الأيسر، وفي الآخر يمر الفوتون من الشِّق الأيمن. وإذا حدث هذا لكل فوتون فسينتهي بنا الحال مع عدد ضخم من الأكوان الموازية. ووفق هذا الترتيب فإن كل نتيجة محتملة لكل تجربة محتملة تقع بالفعل. لكن قبل القفز مباشرة لفكرة الكون الموازي، دعوني أستأنف أولًا الخيط الأساسي لحكايتنا.

### الرابطة المفقودة

في الفصل الخامس وصفتُ النموذج القياسي للتفاعلات الأساسية. والقوى الثلاث التي يتضمنها هذا النموذج كلها موصوفة بواسطة نظريات كمية، بينما رابعةُ هذه التفاعلات الأساسية هي قوة الجاذبية. وقد استعصت هذه القوة على الجهود الهادفة لوضعها داخل مخطط موحد للقوى. وأول خطوة لعمل ذلك ستكون تضمين فيزياء الكم داخل نظرية الجاذبية من أجل إنتاج نظرية للجاذبية الكمية. ورغم الجهود الشاقة المبذولة لعمل ذلك، فإنه لم يتحقق إلى الآن. وإذا حدث أن تحقق هذا الأمر يومًا، فستكون المهمة التالية هي توحيد الجاذبية الكمية مع نظرية موحدة لتفاعلات الجسيمات.




شكل ٨-١: نظرية كل شيء. يُعتقد أن القوى الأربع للطبيعة التي نعرفها في عالمنا المنخفض الطاقة تصير موحدة على نحو معقد عند الطاقات العالية. وبالعودة بالزمن إلى الوراء حتى الانفجار العظيم نتوقع أولًا اتحاد القوة الكهرومغناطيسية مع القوة النووية الضعيفة في قوة واحدة كهروضعيفة. وعند طاقات أعلى من ذلك، ستتحد هذه القوة الكهروضعيفة مع القوة النووية القوية في «نظرية موحدة عظمى». وعند طاقات أعلى من ذلك، قد تنضم الجاذبية لها كي تنتج «نظرية كل شيء». وهذه النظرية، إن وُجدت، فستصف الانفجار العظيم نفسه.

من قبيل المفارقة أن النسبية العامة، التي دشنت فعليًّا الحقبة الحديثة للفيزياء النظرية، هي التي تمثل العقبة الأساسية على طريق التقدم نحو نظرية موحدة لكل قوى الطبيعة. بطرق عدة، تُعَدُّ قوة الجاذبية ضعيفة للغاية؛ فأغلب الأجسام الملموسة تحافظ على تماسكها بواسطة القوى الكهربية العاملة بين الذرات، وهذه القوى أقوى أضعافًا مضاعفة من قوى الجاذبية العاملة بين بعض الأجسام وبعض. لكن رغم ضعف

قوة الجاذبية، فإن لها طبيعة محيرة يبدو أنها تقاوم محاولات الجمع بينها وبين نظرية الكم.

إن نظرية النسبية لأينشتاين نظرية كلاسيكية؛ بمعنى أنها تُماثل معادلات ماكسويل للكهرومغناطيسية التي تتصف بأنها كلاسيكية كذلك؛ فهي تتضمن كيانات تتَّسم بالتجانس لا التباين، وتصف سلوكًا حتميًّا لا احتماليًّا. على الجانب الآخر، تصف فيزياء الكم حالة تكتُّل جوهرية؛ فكل شيء يتكون من حزم متباينة أو كموم. وبالمثل، تمكننا معادلات النسبية العامة من حساب الحالة المحددة للكون في أي وقت بعينه في المستقبل إذا توفرت معلومات كافية في نقطة ما من الماضي. ومن ثم فهي حتمية. أما العالم الكمي، على النقيض من ذلك، فهو خاضع لعدم اليقين الذي يُجسِّده مبدأ عدم اليقين لهايزنبرج.

بطبيعة الحال، النظرية الكهرومغناطيسية الكلاسيكية مناسبة على نحو مثالي للعديد من الأغراض، بَيْدَ أن هذه النظرية تنهار في مواقف معينة؛ مثلًا حين تكون المجالات الإشعاعية قوية للغاية. ولهذا السبب بحث الفيزيائيون عن النظرية الكمية للكهرومغناطيسية، أو الكهروديناميكا الكمية (ووجدوها في النهاية). وهذه النظرية صِيغت أيضًا على نحو متوافق مع النسبية الخاصة، لكنها لا تتضمن تأثيرات النسبية العامة.

ورغم أن معادلات أينشتاين أيضًا تبدو صحيحة لمعظم الأغراض، فإنه من الطبيعي على نحو مشابه أن نحاول بناء نظرية كمية للجاذبية. كان أينشتاين نفسه يؤمن على الدوام بأن نظريته غير تامة من هذا الجانب، وأنها ستحتاج في نهاية الأمر أن يحل محلها نظرية أخرى أكثر اكتمالًا. وإذا شبهنا الموقف هنا بما يحدث للكهرومغناطيسية الكلاسيكية من انهيار، يمكننا الزعم بأن انهيار النسبية العامة سيحدث حين تكون مجالات الجاذبية قوية للغاية، أو على نطاقات أطوال قصيرة للغاية. ولم تُكلَّل محاولات بناء نظرية كهذه بالنجاح إلى الآن.

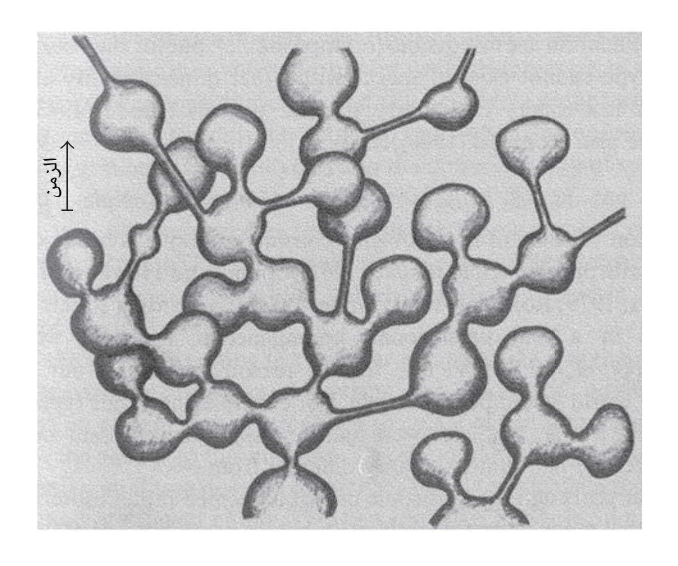
رغم أنه لا يوجد ما يشبه الصورة الكاملة لما قد تكون عليه نظرية الجاذبية الكمية، فإن هناك بعض الأفكار التخيلية المثيرة للاهتمام. على سبيل المثال، بما أن النسبية العامة هي بالأساس نظرية للزمكان، فلا بد للمكان والزمن نفسيهما أن يصيرا كَمِّيَّيْنِ في نظريات الجاذبية الكمية. وهذا يقترح أنه رغم ما يبدو المكان والزمن عليه من اتصال وتجانس في نظرنا، فإنه على النطاقات الضئيلة لأطوال بلانك (نحو $١٠^{-٣٣}$ سنتيمتر)،

يصير المكان أكثر تكتلًا وتعقيدًا، بل وربما يتكون من طوبولوجيا أشبه بالزَّبَد تتكون من فقاقيع تربط بينها أنفاق تسمى الثقوب الدودية تتشكل وتنغلق باستمرار في فترات تُساوي زمن بلانك، الذي يبلغ $١٠^{-٤٣}$ ثانية. يبدو أيضًا من المنطقي تخيُّل أن موجات الجاذبية الكمية، أو الجرافيتونات، قد تلعب الدور الذي تلعبه البوزونات العيارية في التفاعلات الأساسية الأخرى. ومع ذلك، ما من دليل ملموس بعدُ على أن هذه الأفكار صحيحة.

إن النطاقات الصغيرة للغاية من الأطوال والزمن الداخلة في الجاذبية الكمية توضح لنا لماذا تعد الجاذبية الكمية مجالًا للفيزيائيين النظريين لا الفيزيائيين التجريبيين. فلا توجد أداة بُنيت بعدُ قادرة على دفع الجسيمات للدخول إلى منطقة تماثل نطاق طول بلانك أو أقل. وثمة حاجة لطاقات هائلة من أجل الكشف عن الطبيعة الكمية للجاذبية. لكن هذا تحديدًا هو السبب الذي جعل العديد من الفيزيائيين النظريين يبتعدون عن تجارب الجسيمات كهذه التجربة، ويتجهون صوب علم الكونيات. فمن المؤكد أن الانفجار العظيم تضمن ظواهر على نطاق بلانك؛ لذا قد يكون من الممكن نظريًّا معرفة المزيد عن العمليات الفيزيائية الجوهرية من علم الكونيات.

## بداية الزمن

يعد وجود نقطة تفرُّد في بداية الكون خبرًا سيئًا لنموذج الانفجار العظيم. فهذه النقطة، شأنها شأن نقطة التفرد الخاصة بالثقب الأسود، نقطةُ تفردٍ حقيقية تصير فيها درجة الحرارة والكثافة بلا نهاية حقًّا. ومن هذا الجانب، يمكن التفكير في الانفجار العظيم بوصفه أشبه بانعكاس زمني لانهيار الجاذبية الذي يشكل الثقوب السوداء. وكما كان الحال مع حل شفارتزشيلد، رأى كثير من الفيزيائيين أن نقطة التفرد الكونية الأولية يمكن أن تأتي نتيجة لذلك النوع الخاص من حلول معادلات أينشتاين المستخدم في رسم نموذج الانفجار العظيم، لكن من المعروف الآن أن الحال ليس كذلك. وقد عمم هوكينج وبنروز فرضيات بنروز الأصلية بشأن الثقوب السوداء؛ ليبيِّنا أن نقطة تفردٍ كانت تكمن بشكل حتمي في ماضي الكون المتمدد الذي تنطبق فيه ظروف معينة عامة للغاية. إن الفيزياء النظرية تخذلنا تمامًا في اللحظة التي وقع فيها الانفجار العظيم، حين بدأت تلك اللانهائية البغيضة.




شكل ٨-٢: زبد الزمكان. إحدى الأفكار المرتبطة بالجاذبية الكمية تقضي بأن الزمكان نفسه قد يتحول إلى كتلة هائجة من الفقاعات والأنفاق التي تَثِب إلى الوجود وتختفي منه على فترات زمنية تناهز زمن بلانك.

هل من الممكن إذن أن نتجنب نقطة التفرد هذه؟ وإذا كان الحال كذلك، فكيف؟ من المرجح بشدة أن تكون نقطة التفرد الكونية الأولية مجرد نتيجة استنتاجات استقرائية مبنية على تطبيق نظرية النسبية العامة الكلاسيكية في موقف لا تكون فيه هذه النظرية صالحة. هذا هو ما يقوله أينشتاين في الفقرة التي اقتبسناها في الفصل الثالث عند مناقشة الثقوب السوداء. إننا بحاجة إلى نظرية للجاذبية الكمية، لكننا لا نملك نظرية كهذه، وبما أننا لا نملكها فنحن لا نعرف هل ستحل لغز المولد الغامض للكون أم لا.

إلا أن هناك سبلًا لتجنب نقطة التفرد الأولية في النسبية العامة الكلاسيكية دون الالتجاء إلى التأثيرات الكمية. بادئ ذي بدء، يمكننا محاولة تجنب نقطة التفرد من خلال اقتراح معادلة لحالة المادة في الكون المبكر للغاية، لا تنصاع للشروط التي أملاها هوكينج وبنروز. وأهم هذه الشروط هو ذلك القيد على سلوك المادة على الطاقات العالية المسمى «شرط الطاقة القوية». فهناك طرق عدة يمكن من خلالها خرق ذلك الشرط،

وعلى وجه التحديد، يُخرق هذا الشرط خلال التمدد المتسارع الذي تتنبأ به نظريات التضخم الكوني. والنماذج التي يُخرق فيها هذا الشرط منذ البداية المبكرة للغاية يمكن أن تمتلك «نقطة ارتداد» بدلًا من نقطة تفرد. وبالعودة بالزمن إلى الوراء، يصل الكون إلى أقصى حجم له ثم يتمدد مجددًا.

يظل التساؤل بشأن إمكانية تجنب نقطة التفرد من عدمه سؤالًا مفتوحًا، وستظل قضية هل بإمكاننا وصف المراحل المبكرة للغاية من الانفجار العظيم — قبل زمن بلانك — مفتوحة للنقاش، على الأقل إلى أن يتم بناء نظرية كاملة للجاذبية الكمية.

## سهم الزمن

إن وجود نقطة تفرد في بداية الكون يثير مسألة طبيعة المكان نفسها، وطبيعة الزمن تحديدًا، عند لحظة الخلق. وسيكون من اللطيف أن نورد في هذه النقطة تعريفًا واضحًا بماهية الزمن الفعلية. فكل شخص يعرف ما يفعله الزمن، والكيفية التي تميل بها الأحداث إلى أن تترتب في تسلسل. ونحن معتادون على وصف الأحداث التي تَتْبَع على الدوام أحداثًا أخرى بأنها سلسلة من الأسباب والنتائج. بَيْدَ أننا لا نستطيع المضي لما هو أكثر من هذه الأفكار البسيطة. ففي النهاية، أفضل ما قيل عن الزمن هو أن الزمن هو ذلك الشيء — أيًّا ما كان — الذي تقيسه ساعات الحائط.

دمرت نظريتا النسبية لأينشتاين المفاهيم النيوتنية للمكان المطلق والزمن المطلق تدميرًا فعليًّا. فبدلًا من أن يكون لدينا ثلاثة أبعاد مكانية وبُعد زمني واحد تكون كلها مطلقة وغير متغيرة بِغَض النظر عن حركات الجسيمات أو القائمين على التجارب، تدمج الفيزياء النسبية هذه الأمور معًا في كيان رباعي الأبعاد يسمى الزمكان. ولأغراض عدة، يمكن معاملة الزمن والمكان على أنهما متكافآن رياضيًّا في هاتين النظريتين؛ فالراصدون المختلفون عادةً ما يقيسون فترات زمنية مختلفة بين الحدثين نفسيهما، أما الفترات الزمكانية الرباعية الأبعاد فتظل واحدة على الدوام.

ومن ذلك، فإن النجاحات النظرية لأينشتاين تميل إلى أن تخفي الحقيقة التي نعرفها جميعًا من واقع خبرات حياتنا اليومية؛ وهي أن الزمن والمكان مختلفان على نحو جوهري. فبمقدورنا السفر شمالًا أو جنوبًا، شرقًا أو غربًا، لكن لا يمكننا المضي في الزمن إلا قُدُمًا نحو المستقبل، لا إلى الوراء في الماضي. ونحن نتقبل بكل رضًا حقيقة أن لندن ونيويورك توجدان في أي زمن بعينه في موضعين مكانيين مختلفين. لكن لا أحد سيقول

إن العام ٥٠٠١ موجود بالفعل بالطريقة عينها التي نظن أن الحاضر موجود بها. كما أننا لا نمانع في القول إننا في الوقت الحاضر نتسبب في حدوث الأشياء في المستقبل، لكننا لا نعتبر أن الحدثين اللذين يقعان في الوقت ذاته في موضعين مكانيين مختلفين يسبب أحدهما الآخر. فالمكان والزمن مختلفان للغاية بالفعل.

وعلى نطاق كوني، من المؤكد أن الانفجار العظيم يبدو أن له اتجاهًا مفضلًا. بَيْدَ أن المعادلات التي تصفه تتسم بالتناظر الزمني. فكوننا يتصادف أنه آخذ في التمدد لا الانكماش، لكن من الممكن له أن يكون آخذًا في الانهيار على نفسه، ومع ذلك تصفه القوانين عينها. أم هل من الممكن أن يكون التمدد الواسع النطاق للكون هو ما يبرز الاتجاه الزمني الذي نلحظه؟ اقترح هوكينج وآخرون أننا إذا كنا نعيش في كون مغلق توقف في النهاية عن التمدد وبدأ في الانكماش، فإن الزمن سيسير لا محالة في الاتجاه المعاكس خلال مرحلة الانكماش. وفي الواقع، إذا حدث هذا فلن نكون قادرين على أن نلحظ الفارق بين الكون الآخذ في الانكماش الذي يسير فيه الزمن على نحو معكوس وبين الكون الآخذ في التمدد الذي يسير فيه الزمن إلى الأمام. وقد كان هوكينج مقتنعًا لوقت طويل بأن الحال لا بد أن يكون كذلك، بَيْدَ أنه غيَّر رأيه هذا لاحقًا.

تنبع مشكلة أخرى أكثر تجريدًا من حقيقة أن نظرية أينشتاين رباعية الأبعاد بالكامل؛ وهي أن الخط العالمي الكامل لأي جسيم، والذي يصف التاريخ الكامل لحركة الجسيم في الزمن، من الممكن حسابه من واقع النظرية. فالجسيم الموجود في زمنين مختلفين موجود بالطريقة عينها التي يُوجد بها جسيمان في موضعين مختلفين في الوقت عينه. وهذا يتناقض على نحو صارخ مع فكرتنا عن الإرادة الحرة. فهل مستقبلنا موجود بالفعل؟ وهل الأمور محددة سلفًا حقًّا بهذه الطريقة؟

هذه الأسئلة لا تنطبق فقط على نظرية النسبية وعلم الكونيات. فالعديد من النظريات الفيزيائية تتسم بالتناظر بين الماضي والمستقبل بالطريقة عينها التي تتسم بها بالتناظر بين المواضع المكانية المختلفة. وتعد قضية التوفيق بين عدم التناظر المُدرَك للزمن وبين هذه النظريات لغزًا فلسفيًّا عميقًا. وهناك ما لا يقل عن فرعين مختلفين آخرين من الفيزياء النظرية تثار فيهما تلك المسألة التي تسمى أحيانًا مسألة «سهم الزمن».

تنبع هذه المسألة على نحو مباشر من مبدأ فيزيائي شامل النفوذ يسمى «القانون الثاني للديناميكا الحرارية» الذي ينص على أن «إنتروبيا» أيِّ نظام مغلق لا تقل مطلقًا.

والإنتروبيا هي مقياس الفوضى وانعدام النظام داخل أي منظومة، ومن ثم يعني هذا القانون أن درجة انعدام النظام داخل أي منظومة تميل عادةً إلى الزيادة. وقد تحققتُ من هذا تجريبيًّا مرات عدة من خلال المشاهدات الدورية لمكتبي. والقانون الثاني هو تقرير بشأن العالم العياني؛ أي إنه يتعامل مع الأشياء الكبيرة على غرار المحرِّكات البخارية، بَيْدَ أنه ينشأ من التوصيف المجهري للذرات وحالات الطاقة التي تقدمها لنا النظريات الفيزيائية التفصيلية. والقوانين التي تحكم هذه الحالات المجهرية كلها قابلة للانعكاس بالكامل من المنظور الزمني. فكيف إذن ظهر سهم الزمن؟

أيضًا وُضعتْ قوانين مشابهة لقوانين الديناميكا الحرارية الكلاسيكية؛ بهدف وصف خصائص الثقوب السوداء ومجالات الجاذبية عمومًا. ورغم أنه من الصعب وضع تعريف للإنتروبيا المرتبطة بمجالات الجاذبية، فإن هذه القوانين يبدو أنها تشير إلى أن سهم الزمن موجود حتى في الكون الآخذ في الانهيار على ذاته. وهذا هو السبب الذي دفع هوكينج إلى التخلي عن فكرة انعكاس الزمن.

تظهر مشكلة أخرى من مشاكل سهم الزمن من ميكانيكا الكم، التي هي الأخرى متناظرة زمنيًّا، لكن يقع فيها ظواهر عجيبة على غرار انهيار الدالة الموجية عند إجراء أي تجربة. ويبدو أن الدالة الموجية تنهار على هذا النحو في اتجاه زمني واحد فقط، وليس الآخر، لكن كما أشرتُ مسبقًا فإن هذا قد لا يكون أكثر من محض صعوبة مفاهيمية تنشأ عن تفسير ميكانيكا الكم نفسه.

## نظرية اللاحدود

المكان والزمن مفهومان مختلفان للغاية بعضُهما عن بعض في نظرنا نحن، الذين نعيش في عالم منخفض الطاقة يبعد كثيرًا عن الانفجار العظيم. لكن هل يعني هذا أن المكان والزمن كانا مختلفين بعضُهما عن بعض على الدوام؟ أم إنه من الممكن في نظرية كمية للجاذبية أن يكونا شيئًا واحدًا؟ في نظرية النسبية العامة الكلاسيكية، الزمكان بناء رباعي الأبعاد تلتحم داخله على نحو وثيق الأبعادُ المكانية الثلاثة بالبعد الزمني الوحيد. ومن الأفكار ذات الصلة بعلم الكونيات الكمي، والتي طورها هوكينج بالتعاون مع جيم هارتل، تلك الفكرة التي تقضي بأن البصمة المميِّزة للزمن قد تُمحَى حين يكون مجال الجاذبية قويًّا للغاية. وهذه الفكرة مبنية على استخدام بارع لخصائص الأعداد التخيلية. (والأعداد التخيلية هي كل مضاعفات العدد ن الذي يُعرَّف بأنه الجذر التربيعي للعدد

سالب واحد.) وهذا العبث بطبيعة الزمن هو جزء من نظرية اللاحدود لعلم الكونيات الكمي، التي وضعها هارتل وهوكينج. وفق هذه النظرية، بما أن الزمن يفقد خواصه التي تفصله عن المكان، فإن مفهوم بداية الزمن يصير عديم المعنى. ومن ثم فالزمكان بهذه البصمة ليس له حدود. فلا وجود لانفجار عظيم، ولا نقطة تفرد؛ لأنه لا وجود للزمن، بل هو مجرد اتجاه مكاني آخر وحسب.

هذه النظرة للانفجار العظيم لا يوجد بها عملية خلق؛ لأن كلمة الخلق تعني ضمنًا أن هناك «قبل وبعد». وإذا لم يكن ثمة زمن، فما من بداية إذن للكون. والتساؤل عما حدث قبل الانفجار العظيم سيكون شبيهًا بالتساؤل عما يوجد شمال القطب الشمالي. فهو سؤال عديم المعنى.

ينبغي لي أن أؤكد أن فرضية اللاحدود ليست مقبولة من قِبَل كل المختَصِّين بعلم الكونيات الكمي؛ إذ اقتُرحت سبل أخرى لفهم بداية الكون (أو عدم بدايته). وقد اقترح الفيزيائي الروسي ألكسندر فيلنكن معالجة بديلة لعلم الكونيات الكمي توجد فيها عملية خلق محددة، يظهر عن طريقها الكون من العدم بواسطة الأنفاق الكميَّة.

## نظريات كل شيء

حاولتُ أن أصف عددًا قليلًا من المناطق التي عكف فيها فيزيائيو الجسيمات وعلماء الكونيات على محاولة ربط فيزياء الكم بنظرية الجاذبية. وما هذه إلا خطوة واحدة نحو ما يشعر فيزيائيون كُثُر أنه الهدف النهائي للعلم؛ كتابة القوانين الرياضية التي تصف كل القوى المعروفة للطبيعة على صورة معادلة واحدة، يمكنك — إذا لم تكن تهتم لمظهر ملابسك كثيرًا — أن تطبعها على قميصك قصير الأكمام.

إن قوانين الفيزياء، المسماة أحيانًا قوانين الطبيعة، هي الأدوات الأساسية للعلم المادي. وهي تشتمل على معادلات رياضية تحكم سلوك المادة (على صورة جسيمات أساسية) والطاقة وفق العديد من التفاعلات الجوهرية الموصوفة سابقًا. في بعض الأحيان تُستخدم النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها في المختبرات أو مشاهدات العمليات الفيزيائية الطبيعية؛ من أجل استنتاج القواعد الرياضية التي تصف هذه البيانات. وفي أحيان أخرى توضع النظرية أولًا نتيجة لفرضية أو مبدأ فيزيائي، ثم تتلقى تأكيدات تجريبية على صحتها في مرحلة لاحقة. ومع تطور فهمنا، فإن القوانين الفيزيائية

المنفصلة في ظاهرها تصير موحَّدة في نظرية واحدة شاملة. والأمثلة المذكورة سابقًا تُبين إلى أي مدًى ظلت هذه الفكرة مؤثرة عبر المائة عام الماضية أو نحو ذلك.

إلا أن هناك أسئلة فلسفية عميقة تكمن أسفل سطح كل هذا النشاط. على سبيل المثال، ماذا لو كانت قوانين الفيزياء مختلفة في المرحلة المبكرة من عمر الكون؟ هل سيكون بالإمكان مواصلة هذا العمل؟ والإجابة هي أن النظريات الفيزيائية الحديثة تتنبأ بالفعل بأن قوانين الفيزياء تتغير. فمثلًا بينما نمضي نحو المراحل المبكرة للانفجار العظيم، تتغير طبيعة التفاعلات الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة؛ بحيث لا يمكن التفرقة بين النوعين من التفاعلات على طاقات عالية. بيد أن هذا التغيير في القوانين هو نفسه موصوف من جانب قانون آخر؛ يطلق عليه اسم النظرية الكهروضعيفة. ربما يخضع هذا القانون نفسه للتعديل على نطاقات تكون فيها للنظريات الموحدة العظمى الهيمنة، وهكذا دواليك وصولًا إلى بدايات الكون نفسه.

لكن بغض النظر عن ماهية هذه القواعد الجوهرية، على الفيزيائيين أن يفترضوا أنها صالحة للتطبيق في كل زمن منذ الانفجار العظيم. والنتائج المنخفضة الطاقة لهذه القواعد الجوهرية هي وحدها ما يتغير مع مرور الزمن. وفي ضوء هذا الافتراض، يكون الفيزيائيون قادرين على بناء صورة مترابطة منطقيًّا للتاريخ الحراري للكون، لا يبدو أنها تتعارض تعارضًا كبيرًا مع المشاهدات. وهذا يجعل ذلك الافتراض منطقيًّا، بَيْدَ أنه لا يثبت صحته.

ثمة مجموعة أخرى من الأسئلة المهمة تدور حول دور الرياضيات في الفيزياء النظرية. فهل الطبيعة رياضية حقًّا في جوهرها؟ أم هل القواعد التي نبتكرها ما هي إلا نوع من الاختزال كي تمكننا من وصف الكون على أقل عدد ممكن من الأوراق؟ هل نكتشف قوانين الفيزياء أم نخترعها؟ وهل الفيزياء محض خريطة، أم هل هي منطقة الدراسة نفسها؟

هناك أيضًا قضية أخرى عميقة مرتبطة بقوانين الفيزياء، وهي تتعلق ببداية المكان والزمن نفسها. ففي بعض نسخ علم الكونيات الكمي، على سبيل المثال، علينا افتراض وجود قوانين فيزيائية موجودة — إن جاز التعبير — على نحو مسبق لوجود الكون المادي الذي من المفترض أن تصفه هذه القوانين. وقد تسبب هذا في جعْل بعض الباحثين النظريين يتبنَّون نهجًا فلسفيًّا يعكس فكرة أفلاطون. ففي التقليد الأفلاطوني، الوجود الحقيقي مقصور على عالم الأشكال المثالية، لا عالِمنا؛ عالم الحواس غير المثالي. وفي نظر

علماء الكونيات الأفلاطونيين الجدد، فإن ما يوجد حقًّا هي المعادلات الرياضية الخاصة بنظرية كل شيء (المجهولة حتى وقتنا هذا)، وليس عالم المادة والطاقة المادي. على الجانب الآخر، لا ينجرف كل علماء الكونيات إلى التفكير بمثل هذه الصورة. وفي نظر العلماء ذوي الميول النفعية ما قوانين الفيزياء إلا توصيفات أنيقة لكوننا، تكمن أهميتها ببساطة في كونها نافعة.

كانت هناك محاولات عديدة لإنتاج نظريات كل شيء، وقد تضمنت هذه المحاولات أفكارًا عجيبة على غرار التناظر الفائق ونظرية الأوتار (أو حتى مزيج من الاثنين يُعرف باسم نظرية الأوتار الفائقة). وفي نظرية الأوتار الفائقة لا تُعامَل الجسيمات كجسيمات إطلاقًا، بل بوصفها ذبذبات في كيانات أحادية البُعد تسمى الأوتار. وتتوافق الأنماط المختلفة لحلقات أوتار الاهتزاز مع الجسيمات المختلفة. والأوتار نفسها تعيش في مكان ذي عشرة أبعاد أو ستة وعشرين بُعدًا، وبما أن لزمكاننا أربعة أبعاد فقط (ثلاثة أبعاد مكانية وبُعدًا زمنيًّا واحدًا)، فلا بد أن تكون الأبعاد الإضافية مَخْفية. وربما تكون هذه الأبعاد الإضافية مطوية إلى حجم صغير للغاية بحيث لا يمكن ملاحظتها. لكن بعد أن أثارت هذه الفكرة قدرًا كبيرًا من الإثارة في ثمانينيات القرن العشرين، صارت موضة منسِيَّة، وهو ما يرجع بالأساس إلى الصعوبات الفنية الداخلة في التعامل مع مثل هذه الأجسام المعقدة المتعددة الأبعاد. وفي وقت قريب نسبيًّا، شهدت هذه الأفكار نوعًا من البعث من جديد، مع تعميم مفهوم الأوتار إلى «أغشية»، بالإنجليزية branes، وهي أجسام ذات أبعاد أعلى، واسمها مشتق من كلمة غشاء membrane بالإنجليزية، ومع إدراك أن هناك في واقع الأمر نظرية واحدة (تسمى النظرية M) تصف كل النسخ الخاصة بهذا النهج من التفكير. وهذه كلها أفكار مثيرة للاهتمام، لكنها غير مكتملة نسبيًّا؛ إذ لم تقدِّم نظرية الأوتار إلى الآن أي تنبؤات واضحة أثَّرت في علم الكونيات. ويتعين علينا الانتظار كي نرى هل التوحيد الأشمل والأعظم الذي تطمح إليه هذه النُّهُج من الممكن تحقيقه فعليًّا أم لا.

أيضًا يثير البحث عن نظرية كل شيء قضايا فلسفية مثيرة للاهتمام. فبعض الفيزيائيين، ومن بينهم هوكينج، يرون في بناء نظرية كل شيء، بصورة ما، قراءة لعقل الإله، أو على الأقل كشفًا للأسرار الداخلية للواقع المادي، بينما يذهب آخرون ببساطة إلى أن النظرية الفيزيائية ما هي إلا محض توصيف للواقع، أشبه بخريطة له. فقد تكون النظرية مفيدة في عمل بعض التنبؤات وفهم نتائج المشاهدات أو التجارب، لكنها

لا تزيد عن ذلك. وفي الوقت الحالي نحن نستخدم خريطة مختلفة للجاذبية عن تلك التي نستخدمها للكهرومغناطيسية أو التفاعلات النووية الضعيفة. وقد يكون هذا أمرًا مرهقًا، بَيْدَ أنه ليس كارثيًّا. ومن شأن نظرية كل شيء أن تقدم لنا خريطة واحدة، بدلًا من مجموعة متباينة من الخرائط التي يستخدمها المرء في الظروف المختلفة. وهذه الفلسفة الأخيرة نفعية. فنحن نستخدم النظريات للأسباب نفسها التي من أجلها نستخدم الخرائط؛ لأنها مفيدة. إن خريطة خط مترو أنفاق لندن الشهير مفيدة بالتأكيد، بَيْد أنها ليست تمثيلًا دقيقًا على نحو خاص للواقع المادي، وليس ثمة حاجة لأن تكون كذلك.

وعلى أية حال، على المرء أن يقلق بشأن طبيعة التفسير الذي ستقدمه أية نظرية لكل شيء. فعلى سبيل المثال، كيف ستفسر نظرية كل شيء أنها فعلًا نظرية كل شيء، وأنها ليست أية نظرية أخرى؟ وفي نظري هذه هي أكبر المشكلات التي نواجهها على الإطلاق. فهل يمكن لأية نظرية مبنية على ميكانيكا الكم أن تكون تامة بأي معنًى، رغم أن ميكانيكا الكم عينها تتسم في جوهرها بعدم الحتمية؟ علاوة على ذلك، ألقت التطورات في المنطق الرياضي المزيد من الشكوك على قدرة أية نظرية على أن تكون مستقلة تمامًا بذاتها. وقد أثبت عالم المنطق كيرت جودل مُبَرهَنَة، تُعرف باسم مبرهنة عدم الاكتمال، تبيِّن أن أية نظرية رياضية ستحتوي دائمًا أشياءَ لا يمكن إثباتها من داخل النظرية ذاتها.

## المبدأ الإنساني

لطالما كان علم الكونيات معنيًّا بمحاولات الإنسان فَهْمَ الكون من حوله وعلاقته به. ومع تطور الدراسة العلمية للكون، أخذ دور الإنسان يتضاءل. فوجودنا يبدو أمرًا عارضًا، غير مخطط له، وناتجًا ثانويًّا للغرض الذي بُني الكون للوفاء به، بغض النظر عن ماهية هذا الغرض. لكن هذا التفسير خضع مؤخرًا للتحدي من جانب فكرة مقترحة يطلق عليها «المبدأ الإنساني» تقضي بأنه قد يكون هناك، على أي حال، رابط عميق بين وجود الحياة وبين الآليات الفيزيائية الأساسية التي تحكم الكيفية التي يتطور بها الكون. كان براندون كارتر أول من أضاف كلمة «الإنساني» إلى «المبدأ الكوني» المعتاد؛ وذلك للتأكيد على حقيقة أن كوننا «خاص»، على الأقل من حيث إنه سمح لحياة ذكية بأن تتطور داخله.

هناك نماذج كونية صالحة أخرى لا تتوافق مع حقيقة وجود البشر الراصدين. على سبيل المثال، كلنا يعرف أن العناصر الثقيلة كالكربون والأكسجين أساسية للتركيب الكيميائي المعقد الذي تتطلبه الحياة الأرضية كي تتطور. كما أننا نعرف أن هناك حاجة لمرور نحو ١٠ مليارات عام من التطور الكوني كي تخلِّق أجيالٌ من النجوم كمياتٍ كافية من هذه العناصر الثقيلة من الغاز البدائي المكوَّن من الهيدروجين والهليوم، الذي كان موجودًا في المراحل المبكرة لنموذج الانفجار العظيم. ومن ثم نحن نعرف أنه لم يكن بمقدورنا أن نستوطن كونًا يقل عمره عن ١٠ مليارات عام. وبما أن حجم الكون مرتبط بعمره ما دام الكون آخذًا في التمدد، فيُلقِي هذا الحِجَاج المنطقي بعضَ الضوء على مسألة السبب وراء أن الكون على الحجم الذي هو عليه. فلا بد أن يكون الكون كبيرًا؛ لأنه من الضروري أن يكون كبير العمر كي يتوفر لنا الوقت الكافي كي نتطور داخله. هذا النوع من التفكير المنطقي يُطلَق عليه عادةً اسم المبدأ الإنساني «الضعيف»، ويمكن أن يؤدي إلى أفكار مفيدة بشأن الخصائص التي قد يملكها كوننا فقط بفضل وجودنا داخله.

سعى بعض علماء الكونيات إلى بسط المبدأ الإنساني لما وراء ذلك. فرغم أن النسخة الضعيفة من هذا المبدأ تنطبق على الخصائص المادية لكوننا على غرار عمره وكثافته وحرارته، فإن المبدأ الكوني «القوي» يتعلق بقوانين الفيزياء التي وفقًا لها تطورت هذه الخصائص. فيبدو أن هذه القوانين مضبوطة بدقة بحيث تسمح بوجود العمليات الكيميائية المعقدة، التي بدورها تسمح بالتطور البيولوجي، ومن ثم بتطور الحياة البشرية في النهاية. فلو كانت قوانين الكهرومغناطيسية والفيزياء النووية مختلفة اختلافًا طفيفًا عما هي عليه، لكانت العمليات الكيميائية والحيوية مستحيلة. من الظاهر، تبدو حقيقة أن قوانين الطبيعة تظهر وكأنها مضبوطة على هذا النحو؛ كأنها محض مصادفة؛ بمعنى أنه لا يوجد في فهمنا الحالي للفيزياء الأساسية ما يحتِّم أن تتسبب هذه القوانين في ظهور الحياة على هذا النحو. ومن ثم حريٌّ بنا تفسير هذا الأمر.

في بعض نسخ المبدأ الإنساني القوي، يستند المنطق أساسًا إلى فكرة الغائية؛ فقوانين الفيزياء على النحو الذي هي عليه لأنها «يجب» أن تكون كذلك كي تتطور الحياة. وهذا معادل لاشتراط أن يكون تطور الحياة هو نفسه أحد قوانين الطبيعة، وأن قوانين الفيزياء الأخرى المألوفة بدرجة أكبر تابعة لهذا القانون. وهذا المنطق يروق للبعض من ذوي النزعة الدينية في التفكير، بَيْد أن منزلته بين العلماء يشوبها الجدل عن حقٍّ؛ إذ إنه يقترح أن الكون صُمِّم تحديدًا كي يلائم الحياة البشرية.

ثمة بناء بديل للمبدأ الإنساني القوي — وعلى الأرجح أكثر التزامًا بمبادئ العلم — يتضمن فكرة أن كوننا قد يتكون من تجميعة من أكوان صغيرة، وكل واحد منها له مجموعة من قوانين الفيزياء تختلف عن غيرها. قد ينتج هذا عن نظرية موحدة، ينكسر فيها تناظر الطاقات العالية بصور مختلفة في بقاع مختلفة من الكون. ومن الجلي أننا تطورنا فقط في أحد الأكوان الصغيرة الملائمة لتطور الكيمياء والبيولوجيا العضوية، ومن ثم ليس علينا أن نندهش حين نجد أنفسنا في كون تبدو قوانين الفيزياء الجوهرية الخاصة به وكأنها تملك سمات خاصة. وهذا يقدم تفسيرًا ما للخصائص التي تبدو في ظاهرها مفاجئة لقوانين الطبيعة المذكورة سابقًا. ليس هذا تفسيرًا غائيًّا؛ نظرًا لأن قوانين الفيزياء يمكن أن تتباين على نحو عشوائي من كون صغير إلى آخر.

هذه النسخة من المبدأ الإنساني تثير الجدل، وهذا عن حق، لكنها على الأقل تفرق بين «الكيفية» التي تطور بها كوننا و«السبب» الذي تطور من أجله. ولا يزال علينا الانتظار حتى نرى هل بمقدور علم الكونيات تفسير الحال الذي يوجد عليه الكون، لكننا بالتأكيد قطعنا شوطًا عظيمًا على طريق فهم ما يحدث وكيفية حدوثه.

# خاتمة

علم الكونيات مُشابهٌ في أوجه عدة للطب الشرعي؛ فالمختصون في كلا الفرعين لا يستطيعون إجراء تجارب تعيد خلق الأحداث الماضية تحت ظروف مختلفة اختلافًا طفيفًا، كما يفعل أغلب العلماء الآخرين. فيوجد فقط كونٌ واحد، ومسرح واحد للجريمة. وفي كلا الفرعين عادةً ما تكون الأدلة المتوافرة أدلة ظرفية، ويصعب جمعها، وعرضة للتفسيرات المبهمة. ورغم هذه الصعوبات، فإن الحجج المؤيدة للانفجار العظيم، في رأيي، دامغة بما لا يدع مجالًا للشك.

بطبيعة الحال تظل هناك أسئلة مهمة غير مجاب عنها. فما زلنا لا نعرف الشكل الذي عليه معظم المادة الموجودة في الكون. ولا نعرف يقينًا هل الكون محدود أم غير محدود. ولا نعرف الكيفية التي بدأ بها الكون، أو أن التضخم قد وقع من الأساس. ومع ذلك، فإن نقاط الاتفاق بين النظريات والمشاهدات عديدة للغاية ولافتة للنظر؛ بحيث إن أجزاء الصورة المترابطة منطقيًّا يبدو أخيرًا أنها توجد في مواضعها الصحيحة، غير أننا قد نكون مخطئين في ظننا هذا.